

Treball de Fi de Màster

## **Enginyeria Química**

# **Formulació de distàncies de seguretat per a la gestió d'emergències de fuites de gasos líquats mitjançant eines CFD**

### **MEMÒRIA**

**Autor:** Joan Subirana Puigcasas  
**Directores:** Elsa Pastor Ferrer i Eulàlia Planas Cuchi  
**Convocatòria:** Setembre 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

En els últims anys el Gas Natural Liquat (GNL) i el Gas Liquat de Petroli (GLP) s'han convertit en importants fonts d'energia i es preveu que la seva demanda augmenti, principalment als països emergents. En el cas dels gasos és important estudiar el comportament del núvol tòxic o inflamable que originen les seves fuites per determinar el seu risc.

El GNL i el propà, el principal component del GLP, són inflamables. Per això és important estudiar la dispersió del seu núvol inflamable. Aquests dos gasos són emmagatzemats o transportats en estat líquid, aquest fet origina que en cas d'una fuga es formi un núvol visible. Vílchez et al. (2013) van proposar un Factor de Seguretat per la Dispersió (DSF) que relaciona la longitud del núvol inflamable al límit inferior d'inflamabilitat (LFL) i la longitud del núvol visible. Aquest factor pot ajudar als serveis d'emergències a actuar en cas d'una fuga d'un gas líquid perquè permet calcular fàcilment distàncies de seguretat.

Continuant aquests estudis, s'ha simulat diferents fuites de GNL i propà utilitzant un programa anomenat FLACS per determinar les variables que afecten al factor DSF i proposar una correlació d'aquest factor amb variables com ara la velocitat del vent, la humitat relativa o el cabal de fuga.

FLACS és un programa Computational Fluid Dynamics (CFD) que permet simular la dispersió de gasos. En els últims anys, l'ús d'eines CFD ha augmentat ja que permeten modelitzar escenaris complexos com ara àrees obstruïdes o topografies complexes. Tot i aquest augment en el seu ús, encara es troben en estudi i necessiten ser validats.

Aquest treball també contribueix a la validació del programa FLACS en l'estudi de dispersions de gasos líquids. A la literatura hi ha altres estudis que utilitzen FLACS per determinar la concentració de gas, però no ha estat possible trobar cap altre estudi que utilitzi FLACS per determinar les dimensions del núvol visible originat per una fuga d'un gas líquid. Per tant, aquest treball obre una nova manera de validar el programa ja que ha estat possible validar-ne el seu ús per fuites tipus basal. Tot i així, hi ha poques dades experimentals i seran necessaris més estudis per validar completament aquest ús.

En aquest estudi s'ha determinat 3 factors DSF diferents, el proposat per Vílchez et al. i dos més. Un d'ells, anomenat  $DSF_{50\%}$ , relaciona la distància on s'assoleix el 50% del LFL amb la distància del núvol visible i l'altre, anomenat  $DSF_{10\%}$ , relaciona la distància on s'assoleix el 10% del LFL amb la distància del núvol visible. Aquests dos factors permeten determinar les distàncies de l'àrea d'intervenció i d'alerta, dues distàncies utilitzades pels cossos d'emergència.



## Summary

During the last years, the Liquefied Natural Gas (LNG) and the Liquefied Petroleum Gas (LPG) have become important energy sources. Moreover, it is expected that their demand will increase, mainly in emergent countries. In the case of gases, it is important to study the behaviour of the flammable or toxic cloud to determine the risk.

LNG and propane, the main component of LPG, are flammable, so it is important to study the dispersion of its flammable cloud. Moreover, they are stored and transported in liquefied state. The fact of being liquefied origins a visible cloud when there is a leak. Vílchez et al. (2013) proposed a Dispersion Safety Factor (DSF) which relates the length of the flammable cloud at the lower flammable limit (LFL) and the length of the visible cloud. This factor can help the emergency services to act in a liquefied gas leak because they can calculate safe distances easily.

Following their studies, different pool leaks of LNG and propane have been simulated using software called FLACS to determine the dependence of the DSF and to propose a correlation of this factor using variables such as the wind velocity, the relative humidity and the leak flow.

FLACS is a Computation Fluid Dynamics (CFD) tool which allows the simulation of gas dispersion. The use of CFD tools has increased in the last years because they allow modelling more difficult scenarios such as obstructed areas or complex topographies. However, their use is still under study and they need to be validated.

This work also contributes to the validation of FLACS for the study of the liquefied gases dispersion. There are other studies in the literature that validate the use of FLACS to determine the gas concentration, but it has not been able to find another case which validates the use of FLACS to determine the dimensions of the visible cloud originated by a liquefied gas leak. So, this study proposes another way to validate this software. In this study, it has been able to validate the use of FLACS in case of pool leaks. However, there is a lack of reliable experimental data in the literature and more studies will be necessary in the future.

In the study it has been able to determine 3 different DSF, the one proposed by Vílchez et al. and 2 other factors which relate the length of the flammable cloud at the 50% of the LFL and the visible cloud, called  $DSF_{50\%}$ , and another one which relates the length of the flammable cloud at the 10% of the LFL and the visible cloud, called  $DSF_{10\%}$ . These dispersion safety factors allow determining 2 important distances used by the emergency services, the intervention and the alert area.



# Contingut

<b>RESUM</b>	<b>3</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>5</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>10</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>13</b>
2.1. Origen del projecte	13
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>15</b>
3.1. Objectius del projecte	15
3.2. Abast del projecte	15
<b>4. REVISIÓ DE L'ESTAT DE L'ART</b>	<b>17</b>
4.1. Gasos líquats	17
4.2. Accidents derivats de la utilització de GNL i GLP	18
4.2.1. Incendis	20
4.2.2. Explosions	21
4.2.3. Transició ràpida de fase (Rapid phase transitions, RPT)	21
4.2.4. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)	22
4.2.5. Efectes criogènics	22
4.2.6. Dispersió	22
4.3. Dispersió atmosfèrica	23
4.3.1. Tipus de dispersió	23
4.3.2. Factors que afecten la difusió i la convecció	24
4.3.3. Factor DSF (Dispersion Safety Factor)	27
<b>5. MODELITZACIÓ DE LA DISPERSIÓ FUITES</b>	<b>29</b>
5.1. Classificació dels models de dispersió	29
5.2. Dispersió passiva	29
5.2.1. Model Gaussià del plomall	29
5.3. Dispersió de gasos densos o pesants	30
5.3.1. Model de Britter i McQuaid	30
5.3.2. DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model)	33
5.4. Models CFD	34
5.4.1. Simuladors	34

<b>6. FLACS</b>	<b>37</b>
6.1. Tipus de fuga .....	37
6.1.1. Evaporació d'un bassal ("Pool") .....	37
6.1.2. Fuga ("Leak") .....	37
6.2. Condicions de contorn i condicions inicials.....	37
6.3. Geometria i mallat.....	38
6.4. Turbulència .....	38
6.5. Validacions prèvies .....	38
6.5.1. Dispersions en zones sense obstruccions .....	40
6.5.2. Dispersions en zones amb obstruccions.....	42
6.5.3. Conclusions de les validacions prèvies .....	44
<b>7. VALIDACIÓ DE FLACS</b>	<b>45</b>
7.1. Estudis experimentals analitzats.....	45
7.1.1. Maplin Sands .....	45
7.1.2. Burro .....	46
7.1.3. Proves realitzades amb GNL per Gaz de France i amb GLP per HSL.....	47
7.1.4. Projecte USP-UPC (Can Padró) .....	48
7.2. Criteris de simulació.....	49
7.2.1. Condicions simulades .....	49
7.3. Resultats .....	53
7.3.1. Alliberament a raig a través d'un orifici.....	53
7.3.2. Fuites de gas líquid: formació de bassals .....	59
7.3.2.1. Anàlisi sensibilitat.....	61
7.3.3. Conclusions de la validació del programa FLACS .....	63
<b>8. DISSENY EXPERIMENTAL</b>	<b>65</b>
8.1. Condicions simulades .....	65
<b>9. RESULTATS</b>	<b>67</b>
9.1. Efecte de les variables analitzades.....	67
9.1.1. GNL .....	67
9.1.2. Propà .....	71
9.2. Factor de seguretat DSF pel GNL .....	75
9.3. Factor de seguretat DSF pel propà.....	83
<b>10. CONCLUSIONS</b>	<b>91</b>
<b>11. AGRAÏMENTS</b>	<b>93</b>
<b>12. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>95</b>



12.1. Referències bibliogràfiques .....	95
---	----

<b>ANNEXES .....</b>	<b>100</b>
----------------------	------------

Annex A: Condicions simulades .....	100
Annex B: Resultats Can Padró .....	112
Annex C: Resultats experiments HSL .....	114
Annex D: Resultats experiments Burro i Maplin Sands .....	119
Annex E: Experiments GNL i propà .....	129

# 1. Glossari

BLEVE: Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion

CERTEC: Centre d'Estudis del Risc Tecnològic

CFD: Computational Fluid Dynamics

DEGADIS: Dense Gas Dispersion Model

DSF: Dispersion Safety Factor

FAC2: Factor de predicció amb un factor de 2

FB: Fractional bias

FLACS: Flame Acceleration Simulator

GexCon: Global Expansion Consultants

GLP: Gas Lìquat de Petroli

GNL: Gas Natural Lìquat

KFX: Kameleon Fire Ex

LFL: Límit inferior d'inflamabilitat

MG: Geometric mean bias

MHIDAS: Major Hazard Incident Data Service

NMSE: Normalised mean square error

R: Coeficient de correlació

RPT: Rapid Phase Transition

USP: Universitat de São Paulo

VG: Variància geomètrica





## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

El present treball continua la tasca realitzada al Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC) per part de Vílchez et al. (2013) per tal de proposar un factor de seguretat en casos de dispersió de Gas Natural Liqueat (GNL) i propà.

Per tal de proposar aquest factor de seguretat, a diferència de Vílchez et al. (2013) on es modelitzen les fuites amb el codi DEGADIS, en aquest projecte s'ha modelitzat les dispersions amb un simulador tipus CFD (Computational Fluid Dynamics), el simulador FLACS (FLame ACceleration Simulator). Aquest simulador ja va ser utilitzat prèviament en el marc del projecte USP-UPC durant els treballs realitzats per Schleder et al. (2015) amb l'objectiu de validar aquest programari.



### 3. Introducció

Durant els últims anys el Gas Natural Liquat (GNL) s'ha convertit en una important font d'energia. El comerç de GNL ha evolucionat de 55 milions de tones l'any 1999 a 220 milions de tones l'any 2010. Les previsions són que s'arribi a una producció de 450 milions de tones l'any 2020 [1]. Aquest augment de la demanda ha comportat grans inversions en la cadena de subministrament de GNL per tal d'extreure'l i transportar-lo als consumidors finals. On creix més ràpidament la seva demanda és a Àfrica, Amèrica Llatina i Àsia, generant una necessitat d'inversions en infraestructures de subministrament d'aproximadament 100.000 milions de dòlars a l'any fins al 2030 [1].

El Gas Liquat de Petroli (GLP) és un combustible més ecològic que el petroli, produeix menys productes tòxics i no conté metalls pesants, per aquesta raó es considera que pot ser un pas intermedi en el camí cap a l'ús de vehicles més sostenibles, com serien els cotxes elèctrics o els que utilitzin hidrogen [2]. A Europa hi ha més de 7 milions de cotxes que utilitzen el GLP, essent el combustible alternatiu al dièsel o la gasolina més utilitzat [3].

Aquest increment del consum de gasos liquats com el GNL i el GLP augmenta la probabilitat d'accidents. Davant d'aquesta situació es fa necessari estudiar les conseqüències dels possibles accidents derivats del seu ús, transport i emmagatzematge.

Un dels riscos associats al transport i emmagatzematge de gasos liquats és el risc de fuga que, amb una font d'ignició, pot originar un incendi. Aquest fet fa necessari conèixer adequadament el comportament de les fugues d'aquests gasos per tal que els cossos d'emergències puguin actuar d'una forma segura.

#### 3.1. Objectius del projecte

Els objectius d'aquest treball són:

- Validar el programa de simulació FLACS per la simulació de fugues de gasos liquats, simulant diferents experiments de dispersió trobats a la literatura.
- Formular un coeficient de seguretat per tal de dimensionar una zona d'intervenció a partir de l'abast visible del núvol inflamable d'un gas liquat.

#### 3.2. Abast del projecte

En primer lloc, en aquest projecte es realitza una validació del programa FLACS en l'estudi

de la dispersió de gasos líquats. Amb aquesta validació es comprova la variació entre les dades de concentració mesurades i distància de núvol visible d'experiments que es troben en la literatura i les dades obtingudes a les simulacions. S'ha estudiat dos tipus de fuites, fuites que provenen de l'evaporació d'un bassal i fuites amb alliberament a raig a través d'un orifici.

Un cop validat el programa pel seu ús, es pretén realitzar diferents simulacions per tal d'estudiar diferents condicions de fuites de GNL i de GLP i proposar un coeficient de seguretat en la gestió d'emergències de fuites de gasos líquats. Amb aquest coeficient es pretén predir la distància del núvol inflamable a partir de la distància del núvol visible.

S'ha modelitzat les fuites de gas natural líquat (GNL) i propà, proposant un coeficient de seguretat calculable a partir de la velocitat del vent i la humitat relativa que hi ha en el moment de la fuga. S'ha estudiat la dispersió d'aquests gasos en un rang de 2 m/s a 25 m/s de velocitat del vent i un rang d'humitat relativa del 5% al 100%.



## 4. Revisió de l'estat de l'art

### 4.1. Gasos líquats

Els gasos líquats són aquells que pel seu transport o emmagatzematge es sotmeten a pressions superiors a l'atmosfèrica o a temperatures baixes per tal de condensar-los.

En el cas dels gasos que tenen una temperatura crítica superior a la temperatura ambient es solen transportar líquats a temperatura ambient en bombones o camions cisterna a la pressió de vapor i s'emmagatzemen en dipòsits esfèrics. És el cas del propà ( $C_3H_8$ ), butà ( $C_4H_{10}$ ), amoníac ( $NH_3$ ) o diòxid de carboni ( $CO_2$ ) [4].

Els gasos amb una temperatura crítica inferior a la temperatura ambient es solen emmagatzemar i transportar en fase líquida, molt freds i a pressió ambiental, encara que si les quantitats són baixes en alguns casos s'emmagatzemen a pressió. Econòmicament es recomana emmagatzemar a pressió quan les quantitats són petites, pressuritzar o semi-refrigerar per quantitats mitjanes i refrigerar en cas de tenir grans quantitats. És el cas del nitrogen ( $N_2$ ), oxigen ( $O_2$ ) o el metà ( $CH_4$ ) [4].

El GNL és una barreja d'hidrocarburs formada majoritàriament per metà. A pressió atmosfèrica té un punt d'ebullició de  $-162^{\circ}C$  i una diferència de densitats entre quan es troba en estat líquid i gasós de 600:1. El seu emmagatzematge es produeix en tancs a temperatures de  $-165^{\circ}C$  i pressió ambiental [5].

El GLP pot estar format per propà, butà, propilè o butilè, es tracta d'un gas inflamable que es pot encendre amb una energia d'ignició relativament baixa. És un gas incolor i sense olor, motiu pel qual s'odoritza per detectar-lo més fàcilment. En condicions atmosfèriques es troba en estat gasós i és un gas més dens que l'aire, fet que afavoreix la seva acumulació a llocs baixos. El seu emmagatzematge es produeix en estat líquid a temperatura ambient i sota pressió. Per exemple, per poder liquidar butà a  $20^{\circ}C$  s'aplica una pressió de 2 bar i en el cas del propà de 8 bar [6].

Taula 1. Propietats metà i propà [7]

	Metà	Propà	Butà
<b>Pes molecular (g/mol)</b>	16,04	44,09	58,12
<b>Temperatura ebullició (<math>^{\circ}C</math>)</b>	-161,49	-42,25	-0,5
<b>Densitat a <math>0^{\circ}C</math>, 1 atm (g/L)</b>	0,716	2,010	2,594

<b>Límit inferior inflamabilitat (% vol.)</b>	4,4	2,37	1,8
<b>Límit superior inflamabilitat (% vol.)</b>	17	9,5	8,4
<b>Punt inflamabilitat (°C)</b>	-188	-104	-60

Tal com s'ha comentat, el GLP és un gas més dens que l'aire, fet que el farà acumular-se a llocs baixos quan hi hagi una fuga. El GNL, en canvi, és un gas menys dens que l'aire, fet que afavorirà la seva dispersió.

En el cas del GNL, quan es produeix un vessament sobre el sòl o l'aigua, s'evapora a causa de la transferència de calor entre el sòl i el líquid, formant un núvol inflamable amb una part visible deguda a la condensació del vapor d'aigua present a l'atmosfera causada per les baixes temperatures que té el núvol.

En el cas del GLP, que es troba líquid a pressió, quan es produeix el vessament hi ha un descens sobtat de la pressió fins a pressió atmosfèrica, ocasionant una evaporació sobtada (o evaporació flash) que arrossega petites gotes de líquid. Aquestes gotes poden mantenir-se com a tals o evaporar-se. La part del líquid que no s'ha evaporat forma un bassal al sòl que es trobarà a la temperatura d'ebullició i que anirà evaporant-se. Per poder evaporar-se, el GLP requereix calor que anirà absorbint del medi [8].

## 4.2. Accidents derivats de la utilització de GNL i GLP

En una anàlisi portada a terme per Vilchez et al. (1995) [9] d'accidents a plantes químiques i en el transport de matèries perilloses, d'un total de 5.505 accidents inclosos a la base de dades Major Hazard Incidents Data Service (MHIDAS) en els quals es coneixia la substància involucrada, en 940 casos la substància implicada era un gas líquid a pressió (17,1%) i en 95 casos un gas líquid refrigerat (1,7%). A més, en 44 casos la substància implicada va ser un gas líquid però no es va poder determinar quina. Aquestes dades demostren que els gasos líquids estan involucrats en un nombre important d'accidents, fet que fa interessant conèixer amb profunditat el seu comportament en cas de fuga.

Durant la cadena de subministrament del GNL es poden produir accidents en el seu transport, ja sigui en vaixell o per carretera, a les centrals de líquuefacció o regasificació o durant el seu emmagatzematge. Segons el Departament d'Energia dels EUA, des dels inicis del transport de GNL, només hi ha hagut 8 accidents en vaixells metaners que hagin provocat un vessament de GNL [10], fet que demostraria que el seu transport per via marítima és relativament segur, encara que altres autors [10] [11], entre l'any 2000 i 2012,

registren 140 accidents en vaixells de GLP i 21 en vaixells de GNL, però sense especificar-ne les conseqüències. A la taula 2 es descriuen alguns dels accidents més significatius que han involucrat GNL.

*Taula 2. Recull d'accidents de GNL més destacats [12]*

Any	Localitat	Descripció
1973	Nova York, EUA	Vessament, ignició i posterior explosió del GNL vessat en una terminal
1979	Lusby, EUA	Fuita de GNL a través d'una bomba, evaporant i amb ignició
1983	Sodegaura, Japó	Arrencament dels braços de càrrega d'un vaixell amb vessament de GNL sense ignició
1985	Pinson, EUA	Ignició d'un fuita de gas natural a causa d'una soldadura
1987	Mercury, EUA	Ignició d'un núvol de vapor després d'una sèrie de proves del Departament d'Energia dels EUA
1989	Skikda, Algèria	Vessament de GNL d'un vaixell sense produir-se ignició
1989	Thurley, Regne Unit	Fuita en un "jet" a pressió de GNL a través d'una vàlvula oberta amb posterior ignició del núvol provocat
2002	Tivissa, Catalunya	BLEVE-bola de foc posterior a un accident d'uncamió que transportava GNL
2004	Skikda, Algèria	Fuita en una línia de refrigerant d'una planta de líquefacció de GNL provocant una sèrie d'explosions

En el cas del GLP, la majoria dels accidents produïts també es troben en l'etapa de transport (veure la Taula 3).

*Taula 3. Accidents de transport amb GLP involucrat obtinguts a la base de dades MHIDAS (OSH-ROM, 1998) [13]*

Període	Accidents viaris	Accidents ferroviaris
Nombre total d'accidents	55	80

Accidents seguits d'una fuga	46	61
Accidents amb ignició	34	54

En un accident que involucri una empresa química es delimiten dues zones en funció dels efectes que s'hi poden produir [14]:

- Zona d'intervenció: és la zona on les conseqüències dels accidents poden produir un nivell de danys que requereixen la utilització de mesures de protecció.
- Zona d'alerta: és la zona on les conseqüències dels accidents poden produir efectes que no justifiquen l'aplicació de mesures de protecció, excepte per grups crítics de població.

El Pla d'Emergència Exterior del Sector Químic de Catalunya, pel cas de núvols inflamables, considera com a zona d'intervenció el 50% del LFL ja que considera que delimita una zona on es poden rebre efectes per radiació tèrmica. Pel que fa a la zona d'alerta no estableix percentatges fixes però proposa establir un 10% del LFL. Aquestes, juntament amb la distància del LFL seran les distàncies estudiades per tal de formular un coeficient de seguretat.

La British Standard EN1473:2007 defineix una sèrie de mesures a prendre en les instal·lacions de gas natural líquat. D'acord amb aquesta guia, els diferents escenaris de perill que es poden produir en una instal·lació de GNL són [15]:

- Evaporació d'un vessament de GNL
- Dispersió atmosfèrica de vapors de GNL
- Alliberament a raig de gas natural ("jet release").

Aquests escenaris són els mateixos que es poden produir en les instal·lacions de gas líquat de petroli. L'ús de gas natural líquat i de gas líquat de petroli comporten una sèrie de perills associats que es descriuen breument a continuació.

#### 4.2.1. Incendis

El gas natural líquat vaporitza ràpidament a causa de l'absorció de calor; com a resultat es forma vapor inflamable que, si es troba entre els seus límits d'inflamabilitat i té una font

d'ignició, pot derivar en un incendi. En el cas del GLP el descens sobtat de pressió origina una ràpida evaporació. En el cas del GNL, és inflamable quan es troba en concentracions en volum d'entre el 5 i el 15%. En el cas del propà (GLP) els seus límits d'inflamabilitat es troben entre el 2,1 i 9,5%.

El gas líquat pot cremar de tres formes en funció de les característiques de la fuga:

- Dard de foc ("Jet fire"): el dard de foc es produeix quan s'allibera accidentalment vapors inflamables a pressió per una canonada trencada o una brida i troba una font d'ignició [16].
- Incendi de núvol de vapor ("flash fire"): es parla d'incendi d'un núvol de gas o flamarada quan es vessa un gas o vapor inflamable de manera que es dispersa fins a trobar una font d'ignició, en aquest moment es produeix la combustió del núvol. En el cas del gas natural líquat i el gas líquat de petroli, quan es produeix un vessament en estat líquid, hi ha una ràpida evaporació del producte, formant un núvol inflamable [16].
- Incendi de bassa ("pool fire"): en el cas del GLP, al produir-se la fuga hi ha una evaporació flash que dóna lloc a una fuga bifàsica. Una part del líquid és arrossegada en forma d'aerosol, aquestes gotes poden tornar a condensar i acumular-se al sòl formant un bassal que si troba un punt d'ignició pot comportar un incendi de bassa [17].

#### **4.2.2. Explosions**

Les explosions consisteixen en un ràpid alliberament d'energia que produeix un augment de l'energia cinètica de les molècules pròximes, originant-ne una dilatació expansiva. Poden produir-se quan s'allibera un gas que es troba comprimit o quan es produeix una ràpida reacció de combustió. El metà pur no genera grans explosions en espais oberts, però en zones congestionades com ara espais dins d'un vaixell o en zones d'una indústria amb una quantitat d'equips important, la ignició d'un núvol de gas líquat pot derivar en una sobrepressió [18].

#### **4.2.3. Transició ràpida de fase (Rapid phase transitions, RPT)**

Aquest fenomen s'ha pogut documentar en alguns experiments de GNL. Es produeix un canvi de fase instantani de líquid a vapor, a causa de la generació de vapor hi ha un increment de volum que causa un increment de pressió. Aquests canvis de pressió sobtats poden produir danys estructurals.

En la sèrie d'experiments de Coyote (1981) es van produir RPTs a 6 dels 18 experiments

realitzats. En aquests experiments es va descobrir que aquests canvis de fase es produïen quan la concentració de metà era superior al 88% i que anaven associats amb la presència d'aigua. La presència de RPT va comportar l'increment en un 65% de la distància del LFL a causa de l'increment del cabal d'evaporació a conseqüència de l'expansió [19].

#### **4.2.4. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)**

Les BLEVES són un tipus d'explosions dels accidents amb pitjors conseqüències que pot provocar el GLP. Una font de calor externa pot augmentar la temperatura del dipòsit i per tant la pressió fins arribar a un moment que el tanc cedeixi mecànicament, explotant. El líquid que en aquell moment es troba sobreescalfat, a una temperatura superior a la temperatura d'ebullició a pressió atmosfèrica, es despressuritza provocant una vaporització. Aquesta vaporització, que provoca un increment de volum, origina una ona de pressió. Al tractar-se d'una substància inflamable, si troba un punt d'ignició, es pot generar una bola de foc [17].

#### **4.2.5. Efectes criogènics**

Les baixes temperatures en les quals es troba el GNL poden causar danys a estructures i persones. Per tal d'evitar el perill de congelació, els treballadors d'instal·lacions d'emmagatzematge de gasos líquats han de portar roba de protecció en determinades àrees. Aquesta perill no es produeix en el cas del GLP.

#### **4.2.6. Dispersió**

Com s'ha comentat anteriorment, el GNL i el GLP són gasos inflamables, no tòxics i sense olor. El GNL quan s'evapora a pressió atmosfèrica i temperatura ambient, té un factor d'expansió de 1 a 600, fet que pot causar asfíxia pel desplaçament de l'oxigen localitzat en espais confinats. Al produir-se un vessament de GNL, al principi es produirà una evaporació ràpida seguida d'una evaporació més lenta a mesura que el sòl es va refredant. El núvol de vapor resultant és un núvol fred que produeix la condensació del vapor d'aigua present a l'aire, fet que el fa visible. Si el núvol no troba cap punt d'ignició, el núvol s'anirà escalfant i barrejant amb l'aire fins a tornar-se invisible [20].

Quan s'allibera el GLP, al emmagatzemar-se a pressió, es produeix una evaporació sobtada que arrossega gotes de líquid formant una barreja bifàsica. A l'evaporar-se, el gas líquat absorbeix calor, refrigerant l'aire del voltant i provocant la condensació del vapor d'aigua que contingui l'aire.

Donat que aquest treball se centra en l'estudi de la dispersió de fuites de gasos líquats, a continuació s'exposen amb més detall les particularitats del fenomen de dispersió atmosfèrica.

### 4.3. Dispersió atmosfèrica

La dispersió és el procés pel qual un compost s'escampa per un fluid. El compost flueix des de regions amb altes concentracions a regions on la concentració és menor. El procés de dispersió es deu a dos mecanismes:

- **Difusió:** la difusió és un procés de moviment molecular des d'una regió d'alta concentració a una de menor a causa de l'energia cinètica de les molècules. Inclou l'efecte del moviment aleatori de les molècules (moviment Brownià) i la turbulència dels fluids.
- **Convecció:** és el transport mitjançant el moviment del fluid, està relacionada amb els efectes de la inèrcia dels fluids (convecció forçada) i la flotabilitat (convecció natural) [21].

Quan el producte que es dispersa és més dens que l'aire, aquest descendeix cap al sòl.

#### 4.3.1. Tipus de dispersió

- **Dispersió passiva**

La dispersió passiva es refereix a la dispersió de gasos amb flotabilitat neutre. Aquesta es pot donar per dues situacions, una baixa concentració del gas emès o una densitat molt semblant a la de l'aire. De manera empírica, s'ha pogut conèixer que en aquest cas els perfils de concentració són gaussians. [4]

- **Dispersió a dard ("jets") o plomalls**

En cas que es produeixi una fuga d'una planta hi ha dos factors que determinaran el tipus de fuga. Si predomina el moment amb què surt el gas es formarà un dard ("jet") i si predomina la flotabilitat es formarà un plomall que pot tenir flotabilitat positiva o negativa. Un cop aquestes dues forces decauen, la dispersió es produeix a causa de la turbulència.

Un dard té una forma cònica amb origen en un orifici. A causa d'una barreja turbulenta es produeix la dilució del gas [4].

- **Dispersió de gasos densos o pesants**

La dispersió de gasos densos és rellevant ja que molts dels gasos utilitzats a la indústria es poden classificar com a gasos densos. Per exemple, són gasos densos els hidrocarburs, l'amoniac, el clor o l'oxigen ja que tots ells poden formar un núvol de gas més dens que l'aire [16]. La formació d'un núvol de gas dens depèn de:

- ✓ Pes molecular del gas: un gas amb un pes molecular superior al de l'aire serà dens.
- ✓ Temperatura del gas: si el gas es troba refrigerat quan s'evapora condensa la humitat ambiental.
- ✓ Presència d'aerosols: si es produeix l'evaporació de líquid, la temperatura disminueix i el gas es refreda.
- ✓ Temperatura i humitat de l'aire: un gas barrejat amb aire sec tendirà a tenir major densitat que barrejat amb aire humit.

En la dispersió d'un gas pesat es pot observar 3 etapes:

- ✓ Descens gravitacional
- ✓ Difusió gravitacional
- ✓ Dispersió passiva

#### 4.3.2. Factors que afecten la difusió i la convecció

Les condicions meteorològiques i del terreny afecten a la dispersió dels gasos, a continuació es descriuen les més destacades:

- Vent: El vent és aire en moviment a causa de la pressió atmosfèrica i de la distribució de temperatures a la superfície de la Terra. El vent té un efecte important en la dispersió de gasos, la concentració en un plomall és inversament proporcional a la velocitat del vent. Si la velocitat del vent és alta, el material es transportarà més ràpidament però al mateix temps també es diluirà més. La velocitat del vent varia en funció de l'alçada i de la rugositat del terreny, essent menor com més a prop de la superfície. Habitualment es mesura a una alçada de 10 metres. API va donar una equació per modelitzar el perfil de velocitat del vent en el cas d'atmosfera estables [22].

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{z}{z_0} + 4,5 \frac{z}{L} \right) \quad (1)$$

On:

u: velocitat del vent (m/s)

$u_*$ : velocitat de fricció, és el 10% de la velocitat a una alçada de 10 m (m/s).



k: constant de von Karman, té un valor de 0,41.

z: alçada (m).

$z_0$ : rugositat de la superfície (m).

L: longitud de Monin-Obukhov (m).

La longitud de Monin-Obukhov és positiva en condicions estables i negativa en condicions inestables i es defineix com:

$$L = \frac{u_*^3}{0,41g\left(\frac{H}{T}\right)} \quad (2)$$

On g és la gravetat ( $m/s^2$ ), T és la temperatura en valor absolut (K) i el flux de calor superficial ( $J/m^2$ ).

- Estabilitat atmosfèrica: L'estabilitat atmosfèrica és la tendència que té l'atmosfera a augmentar o disminuir el desplaçament vertical de l'aire. És una propietat que no pot ser mesurada, per tant s'estima a partir de la velocitat del vent i de la radiació solar. Es defineixen unes classes d'estabilitats que van des de la classe A a la classe F. A la Figura 1 es pot observar l'efecte de l'estabilitat en la dispersió d'un plomall, en el cas d'atmosfera estables, el desplaçament vertical d'aire és inexistent. A la Taula 4 es defineixen les diferents classes d'estabilitat.

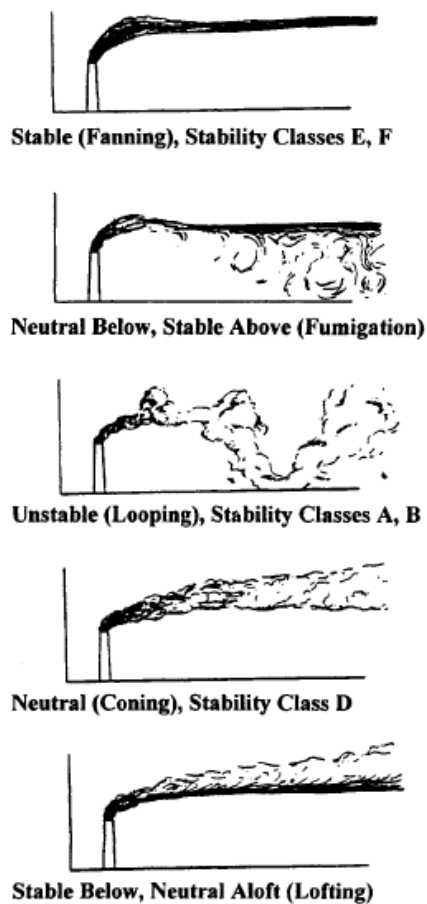


Figura 1. Efecte de l'estabilitat atmosfèrica en la dispersió d'un plomall [4]

Taula 4. Definició de les classes d'estabilitats atmosfèriques segons Pasquill [22]

Estabilitat	Definició
<b>A</b>	Molt inestable
<b>B</b>	Inestable
<b>C</b>	Lleugerament inestable
<b>D</b>	Neutre
<b>E</b>	Lleugerament estable
<b>F</b>	Moderadament estable

Per tal de determinar la classe d'estabilitat es segueix la Taula 5:

*Taula 5. Determinació de la classe d'estabilitat atmosfèrica en funció de la velocitat del vent i la radiació solar [22]*

Velocitat del vent a una alçada de 10 m (m/s)	Dia Nivell de radiació solar			Nit Cobertura del cel	
	Elevat	Moderat	Baix	Més del 50%	Menys del 50%
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

(1) El terme nit es refereix a una hora abans de la posta de sol i una hora després de la seva sortida.

(2) Quan el cel es troba completament cobert es considera estabilitat neutre (D),

- Humitat relativa: la humitat influeix en la dispersió d'un gas quan hi ha una reacció entre el gas i el vapor d'aigua o en el cas de gasos a baixes temperatures donant lloc a la condensació d'aigua. En funció de la humitat es pot calcular la temperatura de rosada, temperatura a la qual comença a condensar el vapor d'aigua que conté l'aire tot provocant la visibilitat del núvol.

$$\text{Temperatura rosada (}^{\circ}\text{C)} = \sqrt[8]{\frac{\text{HR}}{100}} \cdot (112 + 0,9 \cdot T) - 112 \quad (3)$$

On T és la temperatura en graus Celsius i HR la humitat relativa (%).

La humitat relativa és la relació entre la humitat absoluta (la quantitat d'aigua que conté una unitat de volum d'aigua) i la humitat de saturació que indica la quantitat de vapor d'aigua que hi ha en un determinat volum d'aire en el moment que s'arriba a la pressió de vapor de l'aigua.

- Obstacles: el flux al voltant d'objectes és difícil de quantificar però els efectes dels obstacles són importants. A la part posterior dels obstacles hi ha una zona de recirculació que es pot estendre fins a 10 vegades l'alçada de l'obstacle. Als llocs pròxims a obstacles hi ha un increment de la concentració [23].

#### 4.3.3. Factor DSF (Dispersion Safety Factor)

J.A. Vilchez et al. (2013) van estudiar la relació entre la distància de la regió inflamable en

una fuga de GNL i la distància del núvol visible que origina la fuga. A partir d'aquest estudi van decidir formular un coeficient de seguretat a partir de la distància de núvol visible per tal de determinar la distància del límit inferior d'inflamabilitat [24].

Van definir un factor de seguretat per la dispersió (DSF):

$$DSF = \frac{X_{LFL}}{X_{VIS}} \quad (4)$$

On  $X_{LFL}$  és la distància a sotavent del núvol on s'assoleix el límit inferior d'inflamabilitat (m) i  $X_{VIS}$  la distància visible del núvol a sotavent (m).

Quan aquest factor DSF és menor a 1, la regió inflamable es troba dins de la zona visible, en canvi, quan és superior a la unitat la regió inflamable es troba més enllà de la zona visible.

Utilitzant el codi DEGADIS van simular la dispersió de fuites de GNL i de propà. Pel cas del GNL van proposar dues correlacions pel factor DSF, una per velocitats del vent baixes, inferiors a 2 m/s, i una altra per velocitats més altes en funció de la humitat relativa. Dels seus resultats s'observa que quan la humitat relativa és superior al 50%, el factor DSF és inferior a la unitat i que com més baixa és la humitat relativa, més creix el factor DSF [24].

En un estudi posterior van realitzar el mateix estudi en el cas de propà i a partir de les dues correlacions proposades pels autors s'observa que el factor DSF passa a ser inferior a 1 quan la humitat és superior a valors pròxims al 87% d'humitat relativa i que a mesura que la humitat relativa disminueix el valor del factor DSF augmenta.

## 5. Modelització de la dispersió fuites

La modelització de la dispersió ha anat evolucionant al llarg dels anys, des de la utilització de models empírics per fer una estimació aproximada de la dispersió de gasos fins a models més avançats tipus CFD (Computational Fluid Dynamics) que resolen les equacions de conservació de massa, energia i quantitat de moviment en funció del temps i les 3 coordenades espaials.

### 5.1. Classificació dels models de dispersió

- Models empírics: aquests models desenvolupen una sèrie de correlacions basades en dades experimentals, permeten obtenir un resultat fiable i ràpid per alguns escenaris en concret.
- Models integrals: Els models integrals resolen analíticament les equacions de conservació de massa, utilitzant perfils que assumeixen una forma determinada del perfil de concentració. Inclouen coeficients determinats empíricament per poder resoldre les equacions. Els seu principal desavantatge és la modelització de zones amb obstacles.
- Models físics: Aquests models es basen en 3 principis de conservació de massa, d'energia i de quantitat de moviment. Aquests principis s'expressen en forma d'equacions diferencials com ara les equacions de Navier-Stokes. Per tal de resoldre aquestes equacions, s'implementen els models en programes CFD que transformen aquestes equacions en equacions algebraiques discretitzades que es resolen en cada volum de control [25].

### 5.2. Dispersió passiva

Com s'ha comentat anteriorment, la dispersió passiva fa referència als gasos amb flotabilitat neutre, que tenen una densitat molt semblant a la de l'aire. El model més utilitzat per caracteritzar aquest tipus de fuites és el model Gaussià del plomall.

#### 5.2.1. Model Gaussià del plomall

El model gaussià es pot aplicar quan la densitat del gas que es dispersa és menor a la densitat de l'aire. Els seus orígens es troben a les equacions proposades per Pasquill i Guiford (1961). Aquest model es basa en què assumint una velocitat del vent i una

turbulència homogènia la distribució de la concentració segueix una distribució gaussiana [23].

- Model “puff”: descriu fuites instantànies de material.

$$\begin{aligned} < C > (x, y, z, t) = \\ \frac{G^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] x \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

On  $<C>$  és la concentració mitjana ( $\text{kg/m}^3$ ),  $G^*$  és la massa total emesa ( $\text{kg}$ ),  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  són els coeficients de dispersió ens els eixos  $x$ ,  $y$  i  $z$  ( $\text{m}$ ),  $y$  és la distància en la direcció transversal al vent ( $\text{m}$ ),  $z$  és l'alçada sobre el sòl i  $H$  és l'alçada del punt de fuga ( $\text{m}$ ).

- Model del plomall: descriu fuites contínues.

$$\begin{aligned} < C > (x, y, z, t) = \\ \frac{G}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] x \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

On  $<C>$  és la concentració mitjana ( $\text{kg/m}^3$ ),  $G$  és el cabal de la fuga ( $\text{kg/s}$ ),  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  són els coeficients de dispersió ens els eixos  $y$  i  $z$  ( $\text{m}$ ),  $u$  és la velocitat del vent ( $\text{m/s}$ ),  $y$  és la distància en la direcció transversal al vent ( $\text{m}$ ),  $z$  és l'alçada sobre el sòl i  $H$  és l'alçada del punt de fuga ( $\text{m}$ ).

Els avantatges del model són que es troba ben definit i validat. A més, es poden realitzar els càlculs manualment. El principal desavantatge d'aquest model és que la seva validació està limitada a distàncies des de 0,1 a 10 km. És un model que pot estimar a la baixa les distàncies del límit inferior d'inflamabilitat, en canvi és un bon model per estimar distàncies relacionades amb la toxicitat [23]. Aquest model, no és vàlid quan és necessari tenir en compte la presència d'obstacles, hi ha altres models que permeten estudiar escenaris simples podent tenir diferències d'un factor de 10 i per escenaris congestionats cal recórrer a models CFD [23].

## 5.3. Dispersió de gasos densos o pesants

### 5.3.1. Model de Britter i McQuaid

El model de Britter i McQuaid (1988) és un model empíric que consisteix en una sèrie de monogrames realitzats a partir d'observacions experimentals de camp i de laboratori de

fuites contínues i instantànies de gasos pesants [26].

Per poder aplicar aquest model és necessari conèixer el volum inicial del núvol, el flux volumètric inicial del plomall, el temps de fuga i la densitat inicial del gas [23].

Per treballar amb aquest model, en primer lloc s'estima la flotabilitat com:

$$g_0 = \frac{g(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \quad (7)$$

On  $g_0$  és el factor inicial de flotabilitat ( $m/s^2$ ),  $g$  és l'acceleració de la gravetat ( $m/s^2$ ),  $\rho_0$  és la densitat inicial ( $kg/m^3$ ) i  $\rho_a$  és la densitat de l'aire ( $kg/m^3$ ).

En funció de si la fuga és contínua o instantània es defineix una dimensió característica de la font d'emissió. Per fuites contínues és:

$$D_c = \left(\frac{q_0}{u}\right)^{1/2} \quad (8)$$

On  $D_c$  és la dimensió característica de la font d'emissió per fuites contínues de gasos densos (m),  $q_0$  és el cabal volumètric inicial del plomall ( $m^3/s$ ) i  $u$  és la velocitat del vent ( $m/s$ ).

Per fuites instantànies és:

$$D_i = V_0^{1/3} \quad (9)$$

On  $D_i$  és la dimensió característica del punt d'emissió per fuites instantànies (m) i  $V_0$  és el volum inicial emès de gas ( $m^3$ ).

Per comprovar que es pot utilitzar aquest model, és a dir, que els gasos són suficientment pesats, s'han de complir les següents relacions:

$$\text{Per fuites contínues: } \left(\frac{g_0 q_0}{u^3 D_c}\right)^{1/3} \geq 0,15 \quad (10)$$

$$\text{Per fuites instantànies: } \left(\frac{g_0 V_0}{u D_i}\right)^{1/2} \geq 0,20 \quad (11)$$

$$\text{Per determinar si la fuga és instantània s'utilitza la següent relació: } \frac{u R_d}{x} \quad (12)$$

On  $u$  és la velocitat del vent ( $m/s$ ),  $R_d$  és el temps de fuga (s) i  $x$  és la distància sotavent (m). Si aquesta relació és superior a 2,5 la fuga és contínua i si és inferior o igual a 0,6 es considera una fuga instantània.

Per tal de conèixer una concentració en una posició en la direcció del vent s'utilitzen els següents diagrames:

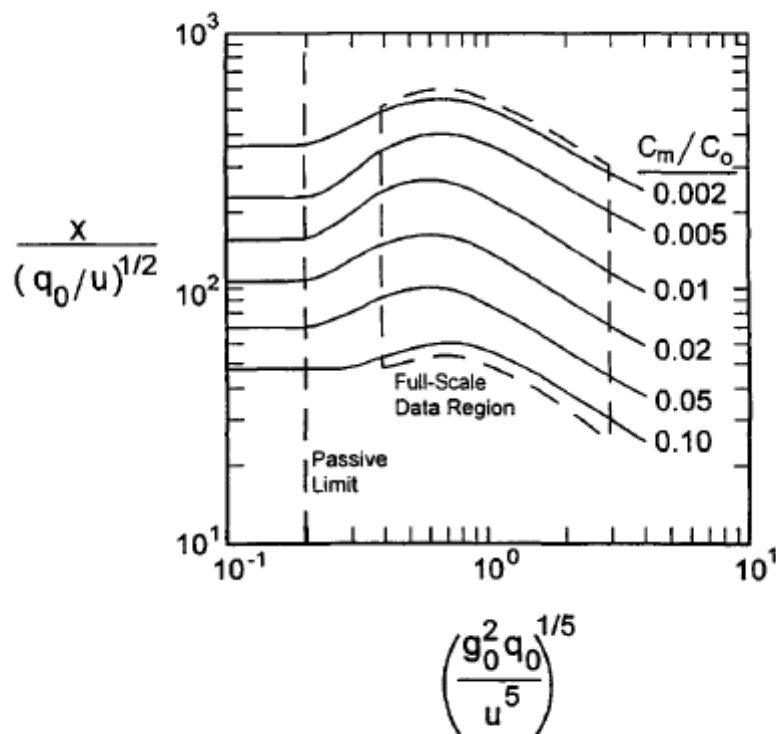


Figura 2. Correlacions de Britter-McQuaid per la dispersió de fuites contínues de gasos densos [4]

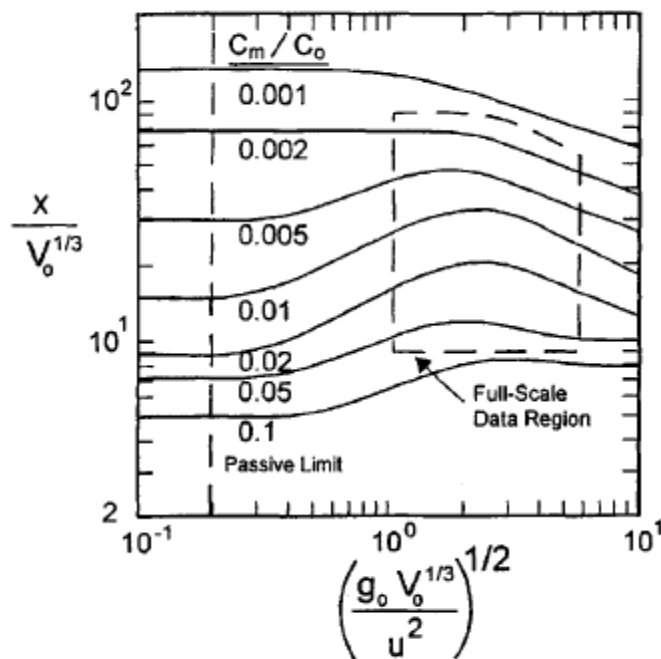


Figura 3. Correlacions de Britter-McQuaid per la dispersió de fuites contínues de gasos densos [4]



Aquest model utilitza dades experimentals preses en terrenys rurals plans i per tant només es pot utilitzar en aquestes condicions. És un model que no permet considerar variables com la rugositat del terreny, perfils del vent o l'alçada de la fuita però és raonablement fàcil d'aplicar. La principal limitació del model és que només permet obtenir la concentració en un punt fix a sotavent [27].

### 5.3.2. DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model)

DEGADIS és un model integral unidimensional desenvolupat pels Drs. Havens i Spicer per la U.S. Coast Guard i el Gas Research Institute per simular la dispersió de gasos criogènics inflamables. Aquest model es va desenvolupar per predir la dispersió de gasos densos a nivell del sòl, emesos amb un moment inicial zero a la capa límit. DEGADIS descriu els processos de dispersió que acompanyen el flux guiat per la gravetat i l'entrada del gas a la capa límit atmosfèrica [28].

DEGADIS és un model per a fuites contínues, encara que també es pot adaptar per fuites instantànies. Aquest model utilitza una sèrie de correlacions, per exemple per modelitzar el flux de calor entre el sòl i el núvol en el cas d'hidrocarburs com propà i metà:

$$h_{gr} = 18 \left[ \left( \frac{\rho}{M} \right)^2 \Delta T \right]^{1/3} \quad (13)$$

Per transferència de calor en condicions de convecció forçada:

$$h_{gr} = \left[ 1,22 \frac{u_*^2}{u_r} \left( \frac{z_r}{H} \right)^{\alpha'} \right] \rho c_p \quad (14)$$

Correlació per dispersió vertical en flux estratificat:

$$\frac{u_e}{u_*} = \frac{k}{\phi(Ri_*)} \quad (15)$$

On  $u_e$  és la velocitat d'entrada,  $k$  és una constant i  $Ri_*$  el nombre de Richardson modificat.

$$\phi(Ri_*) = 0,88 + 0,099 Ri_*^{1,04} + 1,4 \times 10^{-25} Ri_*^{5,7} \quad \text{si } Ri_* \geq 0 \quad (16)$$

$$\frac{0,88}{1 + 0,65 |Ri_*|^{0,6}} \quad \text{si } Ri_* < 0 \quad (17)$$

A més, el model inclou un model per plomalls que permet predir la trajectòria i la dilució vertical de raigs d'aerosols i quan el plomall retorna al nivell del sòl DEGADIS prediu la dispersió del plomall a aquest nivell.

Els seus desenvolupadors recomanen una sèrie de precaucions en l'ús d'aquest model:

- El model per plomalls només es pot utilitzar per fuites amb una orientació vertical.
- Tant el model del plomall com DEGADIS assumeixen que el flux no té obstacles. S'assumeix un perfil logarítmic pel vent pel cas de plomalls i un perfil potencial pel model DEGADIS. Aquest model només es pot utilitzar quan l'amplada de la capa dispersada és superior a la rugositat del terreny.

El model ha estat validat comparant-lo amb observacions realitzades als experiments de Maplin Sands, Burro, Coyote, etc. Per exemple, Hanna et al. (1993) van comparar les concentracions mesurades els experiments de Burro, Coyote, Desert Tortoise i Goldfish amb les concentracions obtingudes utilitzant el model DEGADIS i comparant-les amb altres models com HEGADAS, HGSYSTEM i SLAB. Les seves conclusions van ser que era un model relativament bo per predir la concentració de plomalls per fuites contínues e instantànies de gasos pesants, obtenint desviacions mitjanes entre el  $\pm 30\%$ -50%. Tot i així el model no podia predir correctament les variacions de concentració amb el temps i tenia una sensibilitat baixa a les variacions de la rugositat del terreny [26].

## 5.4. Models CFD

Els simuladors CFD (Computational Fluid Dynamics) són eines que permeten modelitzar problemes de flux de fluids. Aquests simuladors es basen en les equacions fonamentals de la dinàmica de fluids com les equacions de conservació de massa, energia i quantitat de moviment.

Per tal de resoldre el problema és necessari discretitzar el domini a estudiar en petites cel·les. Les equacions amb derivades parcials es transformen en equacions algebraïques i es resolen a cada cel·la. Com que les equacions es resolen per cada cel·la, el mallat escollit és important ja que el resultat pot variar en funció de la mida escollida i del nombre de cel·les en que s'ha dividit el domini [29].

En l'anàlisi de dispersió de gasos mitjançant mètodes CFD, aquests es diferencien dels altres models mencionats prèviament que permeten introduir geometries i topografies complexes com ara edificis, equips de procés o obstacles.

### 5.4.1. Simuladors

Hi ha diferents eines CFD per simular la dispersió atmosfèrica.

#### **FEM-MP**

El model FEM-MP és un model de simulació basat en una sèrie de tècniques d'elements

finitos que pot incloure geometries complexes. S'utilitza al "Lawrence Livermore National Laboratory" del Departament d'Energia dels Estats Units. S'ha utilitzat per estudiar la dispersió de productes químics en ambients urbans [30].

### ***FLUENT - Ansys Inc.***

FLUENT és un codi genèric que pot modelitzar diferents fenòmens, en el cas de la dispersió es pot estudiar dispersions passives i de gasos pesants. Com els altres codis CFD, FLUENT resol una sèrie d'equacions de conservació de massa, quantitat de moviment, energia, turbulència, pressió i concentració. Conté diversos models de turbulència que s'han d'escollir en funció del sistema analitzat [25].

### ***KFX***

Kameleon FireEx (KFX) és un software comercial per realitzar simulacions CFD en 3D. Està basat en els principis de conservació de matèria, energia i quantitat de moviment. Aquestes equacions, són resoltes en cada volum de control. Com que aquestes equacions no es poden resoldre analíticament, es discretitza el domini de simulació i es resolen per cada volum de control. Per modelitzar la turbulència utilitza un model  $k-\varepsilon$  [31].

### ***FLACS***

FLACS (FLame ACceleration Simulator) és un simulador comercial CFD desenvolupat per l'empresa Global Expansion Consultants (GexCon) per modelar les conseqüències de dispersions, explosions i incendis. És el simulador utilitzat en aquest treball i es descriurà més exhaustivament a continuació.



## 6. FLACS

FLACS (FLame ACceleration Simulator) és un simulador comercial CFD desenvolupat per l'empresa Global Expansion Consultants (GexCon) per modelar les conseqüències de dispersions, explosions i incendis.

El programa resol les equacions de conservació de matèria, moment i entalpia utilitzant un mètode de volums finits. En el cas de fuites i dispersions es modelitza el flux en la capa límit atmosfèrica fixant els perfils de velocitat, temperatura i turbulència als seus límits [32].

### 6.1. Tipus de fuga

#### 6.1.1. Evaporació d'un bassal ("Pool")

El mètode "pool" permet definir les propietats d'una fuga de líquid al sòl. És necessari definir el cabal de fuga, la posició i el radi del bassal, la temperatura del sòl, rugositat i tipus de sòl.

#### 6.1.2. Fuga ("Leak")

També es pot simular fuites tipus dolls. En aquest cas és necessari especificar la posició, la direcció, la duració de la fuga, l'àrea de l'orifici, el cabal i la velocitat de sortida.

### 6.2. Condicions de contorn i condicions inicials

A les simulacions de dispersió és necessari especificar les condicions de contorn, FLACS requereix una sèrie de paràmetres que permeten modelitzar la dispersió:

- FLACS té diferents mètodes per calcular les condicions de contorn (Euler, NOZZLE, Plane wave i wind), en el cas de dispersions recomana utilitzar condicions de contorn NOZZLE, un mètode que es pot utilitzar en condicions sòniques i subsòniques.
- Condicions del vent: el vent és un paràmetre important en la simulació d'una dispersió, és necessari especificar la direcció del vent, la velocitat a una alçada de referència i el temps que tarda a estabilitzar-se.
- Intensitat relativa de la turbulència: és la relació entre la fluctuació isotròpica de la velocitat i la velocitat mitjana, té uns valors típics entre 0,0 i 0,1.
- Coeficient de Pasquill: determina la classe d'estabilitat atmosfèrica, en funció

d'aquest paràmetre FLACS crea el perfil de velocitat i turbulència del contorn.

- Temperatura i pressió inicial.
- Rugositat del terreny.

### 6.3. Geometria i mallat

El volum de simulació es divideix en una sèrie de volums de control. És necessari escollir una mida de mallat suficient per obtenir un resultat en un temps acceptable i amb una bona resolució.

La posició de les línies del mallat s'ha de realitzar d'acord amb la geometria. El objectes grans (superiors a 1,5 vegades un volum de control) com les parets s'han d'alinejar a les línies del mallat.

Segons el manual d'utilització de FLACS, en el cas de la simulació de dispersions s'ha de seguir les següents recomanacions:

- Cobrir el domini amb un mallat uniforme de per exemple 1 m.
- Refinar el mallat en la regió propera d'un jet perpendicular.
- Estirar la quadricula fora de la regió d'interès cap als límits del domini.

### 6.4. Turbulència

El programa FLACS utilitza una aproximació del model Reynolds-Averages Navier-Stokes (RANS). Es modelitza mitjançant un model de dues equacions, el model  $\kappa$ - $\epsilon$ . Aquest és un model que resol una equació per la turbulència a causa de l'energia cinètica  $\kappa$  i una per la dissipació de la turbulència  $\epsilon$  [21].

### 6.5. Validacions prèvies

Abans d'utilitzar un simulador són necessaris dos passos previs, de verificació i validació. En el procés de verificació es compara la implementació del model amb la seva base matemàtica. L'empresa desenvolupadora de FLACS, GexCon, realitza aquest procés de verificació internament. En primer lloc s'assegura que independentment del sistema operatiu que s'utilitza s'obtinguin els mateixos resultats. A més, quan s'implementa un nou model es realitzen simulacions per assegurar que és consistent internament. Això inclou comprovar

que quan les condicions inicials i de contorn són les mateixes, el model doni els mateixos resultats i que sigui independent de la direcció [21].

En el procés de validació es comparen les dades mesurades experimentalment amb les dades simulades, això permet determinar si el model s'aproxima bé a la realitat física i en quins rangs és aplicable.

Per tal de validar un model diversos autors com Fox (1984), Hanna (1989), Hanna et al (1991) i ASTM (2000) han establert una sèrie de criteris i mètodes que suposen la utilització d'una sèrie d'estadístics [26].

Per avaluar les observacions d'un model, Hanna (1993) suggereix la utilització d'una sèrie de mesures estadístiques com són l'error relatiu ("fractional bias", FB), l'error respecte la mitjana geomètrica ("geometric mean bias", MG), l'error mig quadrat normalitzat ("normalized mean square error", NMSE), la variància geomètrica (VG), el coeficient de correlació (R) i el factor de prediccions amb un factor de dos (FAC2) [26].

$$FB = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})}{0,5 \cdot (\overline{C_o} + \overline{C_p})} \quad (18)$$

L'error relatiu (equació 18) permet conèixer el pes de l'error respecte del valor mig normalitzat.

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p}) \quad (19)$$

L'error respecte la mitjana geomètrica (equació 19) permet conèixer el pes de l'error respecte la mitjana geomètrica.

$$NMSE = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})^2}{\overline{C_o} \cdot \overline{C_p}} \quad (20)$$

L'error mig quadrat normalitzat (equació 20) permet conèixer la dispersió respecte el valor mig normalitzat.

$$VG = \exp \left[ \overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2} \right] \quad (21)$$

La variància geomètrica (equació 21) permet conèixer la dispersió de les dades respecte la mitjana geomètrica.

$$R = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_o})(\overline{C_p} - \overline{C_p})}{\sigma_{CP} \sigma_{P0}} \quad (22)$$

El coeficient de correlació (equació 22) mesura la relació lineal entre dues variables, si R=1

hi ha una correlació perfecte.

$$0,5 \leq \frac{C_P}{C_0} \leq 2,0 \quad (23)$$

El factor de 2 (FAC2, equació 23) fa referència a la fracció de dades que es troben entre un predites que es troben entre la meitat i el doble del valor observat.

La utilització de cada estadístic depèn de les dades i de l'objectiu concret però comporten una sèrie d'avantatges e inconvenients. L'error relatiu i l'error quadrat normalitzat poden trobar-se sobre influenciats per algunes poques dades molt allunyades del valor observat, en canvi la mitjana geomètrica i la variància geomètrica dilueixen aquest efecte però en canvi pot comportar errors més grans quan es tracta valors baixos. El factor de 2 és la mesura més robusta ja que no està influenciada pels valors mesurats [33].

Un model perfecte implica que la mitjana geomètrica, la variància geomètrica i el factor de 2 tinguin un valor de 1 i que FB i NMSE tinguin un valor de 0.

#### 6.5.1. Dispersions en zones sense obstruccions

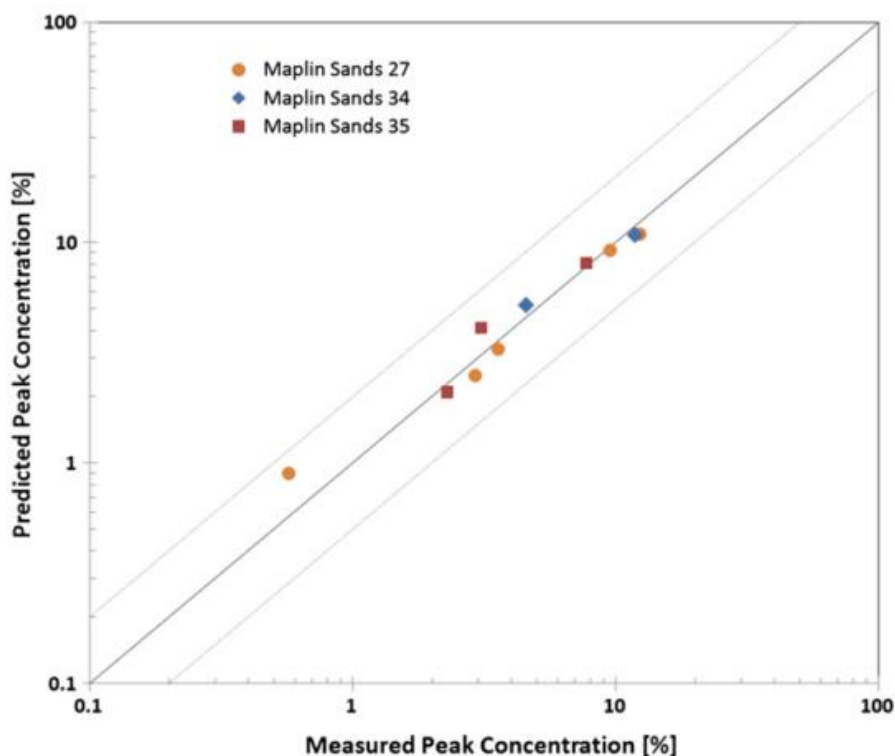
Hanna et al. (2004) realitzaren un estudi per validar els resultats obtinguts amb simulacions del programa FLACS, van comparar diferents experiments, en zones amb i sense obstruccions. Un dels casos estudiats sense obstruccions va ser l'experiment de Prairie Grass, aquest experiment pretenia avaluar fuites contínues en forma de plomall a una alçada pròxima al sòl. Per això, es va emetre un gas amb flotabilitat neutra en un camp des d'un tub a una alçada de 0,46 m. Els resultats obtinguts de les simulacions demostren una tendència a predir concentracions lleugerament més baixes, un 20%. Tot i això, els autors no ofereixen dades del domini de la regió simulada ni de les mides del mallat utilitzat [34].

Hansen et al. (2010) [35] van realitzar la validació amb FLACS de diverses dispersions de fuites de GNL sobre aigua en zones obertes com ara els experiments de Burro, Coyote o Maplin Sands. Els experiments de Burro van consistir en una sèrie de vessaments de GNL realitzades al Naval Weapons Center a China Lake, Califòrnia, l'estiu del 1980. Els experiments de Coyote també van tenir lloc al Naval Weapons Center i van consistir en 10 experiments de vessaments de GNL, 5 d'ells per estudiar la dispersió del núvol inflamables i la seva ignició i 5 per estudiar explosions RPT. Per últim, els experiments de Maplin Sands (Anglaterra, 1980) van comportar el vessament de GNL i GLP a la superfície del mar amb l'objectiu d'estudiar el comportament dels núvols formats.

En els experiments de Maplin Sands va utilitzar el "pool model" de FLACS amb un domini de simulació de -300 a 900 m en la direcció del vent, de -250 a 250 m en perpendicular al vent i 100 m d'alçada. El mallat tenia una resolució de 1 m x 1 m x 0,33 m i es va anar ampliant a



mesura que s'allunyava de la fuga amb unes 315.000 cel·les.



*Figura 4. Concentracions simulades i concentracions mesurades en el cas de Maplin Sands [35]*

En el cas de Maplin Sands, tal i com s'observa a la Figura 4, la majoria de les concentracions es troben pròximes a una relació lineal entre les mesurades i les predites i totes les dades es troben dins de l'interval d'un factor de 2.

En el cas dels experiments de Burro també es va simular utilitzant el model de "pool" de FLACS. En aquest cas es va negligir les característiques del terreny que presenta un desnivell de 7° en 80 m. Aquestes condicions van poder afectar a les simulacions amb velocitats del vent més baixes com l'experiment Burro 8. Es va utilitzar un domini de simulació de -100 a 1000 m en la direcció del vent, de -200 a 200 m perpendicularment i de 50 m d'alçada. Es va utilitzar un mallat amb una resolució de 1 m x 1 m x 0,5 m amb un total de 430.000 cel·les. En aquesta validació es va descobrir que l'impacte més important el tenen les condicions de contorn. Per realitzar les simulacions s'utilitzà un valor mitjà de la velocitat del vent i la seva direcció. Això, en casos on hi ha fluctuacions importants, pot comportar que la simulació no sigui representativa. Aquest seria el cas de l'experiment número 8 de la sèrie de Burro (Burro 8 a la figura 6).

Pels experiments de Coyote es va definir un domini de simulació de -100 a 600 m en la direcció del vent, de -200 a 200 m a la direcció transversal al vent i des de -1,5 a 50 m

d'alçada. Es va aplicar una resolució de 1 m x 1 m x 0,5 m que es va anar ampliant a mesura que s'allunyava del vessament.

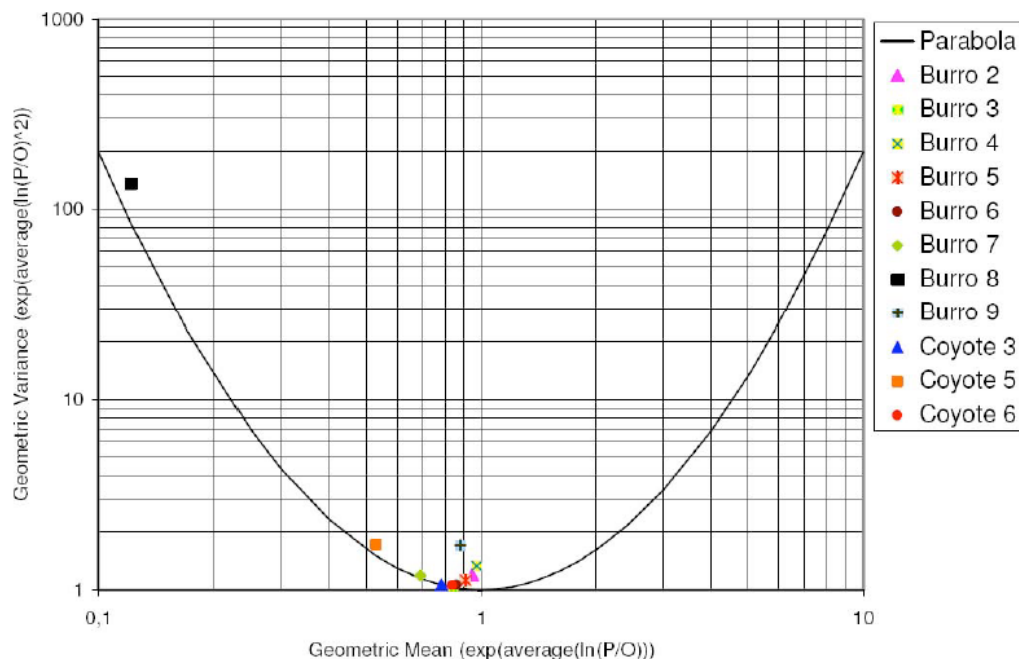


Figura 5. Comparació dels resultats obtinguts amb FLACS i els resultats experimentals de les sèries Burro i Coyote [21]

En el cas de Coyote els resultats van demostrar una excel·lent correlació entre els experiments i les simulacions, principalment pel test Coyote 5 on el 91% dels resultats de la simulació es troben en un rang de factor de 2 respecte les dades experimentals. Com s'observa a la Figura 5 la majoria dels experiments tenen un biaix en la seva mitjana geomètrica i una variància geomètrica pròxims a la unitat, això indica que els valors simulats són pròxims als valors mesurats en la majoria dels casos i per tant la simulació és bona.

### 6.5.2. Dispersions en zones amb obstruccions

En el mateix estudi de Hanna et al. (2004) comentat anteriorment per zones sense obstruccions, també es va validar la utilització del programa FLACS en casos amb obstacles, els experiment MUST i Kit Fox [34].

Els experiments MUST van consistir un 37 fuites de propilè en presència de 120 obstacles (containers de 12,2 m de longitud, 2,42 m d'amplada i 2,54 m d'alçada) al desert de Dugway Proving Ground. A les simulacions van obtenir una desviació relativa de 1,5 vegades la mitjana i el 64% de les observacions es trobaven en un factor de 2, segons els autors aquestes dades són acceptables [34].

Als experiments de Kit Fox es va diverses fuites de diòxid de carboni a nivell del sòl utilitzant obstacles de dues mides diferents (2,4 m i 0,2 m d'alçada). Per totes les sèries d'experiments es va obtenir un error relatiu inferior al 20%, una desviació relativa inferior al 50% i el 90% de les dades simulades es trobaven a un factor de 2 de les dades mesurades [34].

Els experiments de Falcon van consistir en una sèrie de fuites de GNL portades a terme pel Livemore National Laboratory el 1987 per tal d'estudiar l'efectivitat de les barreres de vapor per tal de mitigar la dispersió d'aquestes fuites. Es va mesurar la concentració i la temperatura a 50 m, 150 m i 250 m del punt de fuga amb sensors a 1 m, 5 m, 11 m i 17 m d'alçada. Per tal de simular aquest experiment es va simular un domini de -150 a 300 m en la direcció x, de -100 a 100 m en la direcció y i de 0 a 50 m d'alçada [35].

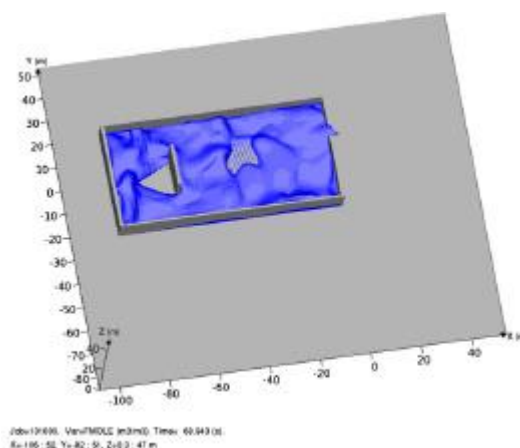


Figura 6. Imatge d'una simulació de Falcon 1 als 60s [35]

A la simulació (Figura 6) es representa l'àrea on la concentració és superior al LFL, segons la simulació aquesta concentració ja arribava a totes les barreres, en canvi en aquest instant els sensor encara no mesuraven concentracions tant elevades, com que l'error observat era molt gran els autors, Hansen et al. (2010), consideren que no van poden modelitzar correctament la fuga [35].

Middha et al. (2009, 2010) van realitzar una validació del programa FLACS per estudiar de la dispersió i posterior explosió de fuites d'hidrogen en forma de doll ("jet"). Els experiments estudiats havien estat realitzats pel Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) com a part del projecte InsHyde de la xarxa patrocinada per la Unió Europea Network of Excellence (NoE) HySafe. Van estudiar dolls sònics i subsònics i també fuites d'hidrogen líquid. En el cas dels dolls van utilitzar orificis de 100 mm, 21 mm i 4 mm. Principalment realitzaren una valoració qualitativa i van arribar a les conclusions que l'ajust de les concentracions simulades respecte les mesurades era bo i que les millors prediccions van resultar les que tenien un alt moment d'inèrcia en el moment de la fuga [36] [37].

### 6.5.3. Conclusions de les validacions prèvies

A partir de les validacions realitzades prèviament del programa FLACS, s'han extret les següents conclusions [35]:

- La predicció per experiments sense obstruccions és molt bona, tant per experiments a gran escala com en túnels de vent. Aproximadament el 88% de les dades simulades es troben en un rang de factor de 2 de diferència amb les dades reals.
- Les prediccions per experiments amb obstruccions en túnels de vent també són molt bones, un 98% de les dades s'ajusten a un factor de 2.
- La dispersió d'experiments amb obstruccions a gran escala no presenten un bon ajust segons Hansen et al. (2010) ja que només es disposava de les dades dels experiments de Falcon i el fet que aquest experiment no es pugui modelitzar amb el model "pool" i la dificultat de definir el terme font li van impedir un bon model. En canvi, Hanna et al. (2004) i Middha et al. (2009, 2010) si que van aconseguir modelitzar de forma acceptable fuites en zones amb obstruccions.
- A la literatura no s'ha trobat cap cas on es validi la utilització del programa FLACS per tal de mesurar la distància visible del núvol que s'origina en una fuga d'un gas líquat, en tots els casos es compara la concentració mesurada i la concentració obtinguda a la simulació dels gasos estudiats.
- A la majoria de validacions de la literatura hi ha una validació qualitativa on es comparen les concentracions i en algunes es fa un estudi quantitatiu, principalment utilitzant els indicadors estadístics comentats anteriorment i sobretot estudiant el percentatge de dades que es troben dins d'un rang d'un factor de 2.
- La majoria de les validacions del programa FLACS segueixen les guies de Chang i Hanna (2004) i consideren que un model té un bon ajust quan [33]:
  - ✓ El 50% de les concentracions calculades amb el model es troben en un factor de dos de les concentracions observades.
  - ✓ La desviació de la mitjana relativa es troba al rang del  $\pm 30\%$ , això implica que FB es trobi entre -0,3 i 0,3 i/o que MG es trobi entre 0,7 i 1,3.
  - ✓ La dispersió a l'atzar es troba entre un factor de dos i un factor de tres de la mitjana, es compleix quan NMSE és inferior a 4 i/o VG inferior a 1,6.

## 7. Validació de FLACS

Per poder proposar un coeficient de seguretat serà necessari conèixer els perfils de temperatura i de concentracions per tal de determinar l'abast del límit inferior d'inflamabilitat i el del núvol visible. Les validacions que s'han trobat a la bibliografia i que s'han resumit a la secció anterior fan referència únicament al valor de la concentració. Per tal d'estudiar l'adequació del programa FLACS en l'obtenció del coeficient de seguretat, s'ha considerat interessant realitzar una tasca prèvia complementària de validació del programa. Aquesta tasca s'ha realitzat comparant les dades obtingudes en les simulacions amb resultats de tests experimentals.

### 7.1. Estudis experimentals analitzats

#### 7.1.1. Maplin Sands

Els experiments de dispersió i combustió de Maplin Sands (1980) van comportar el vessament de Gas Natural Liquefiet (GNL) i propà líquid (GLP) a la superfície del mar amb l'objectiu d'estudiar el comportament dels núvols de GNL i GLP sobre el mar. En cada experiment es van alliberar aproximadament 20 m<sup>3</sup> de substància [38].

El lloc on es van realitzar els experiments és una zona amb un pendent de 1/1000 a la zona nord de l'estuari del riu Tàmesi a Anglaterra. El punt de fuga es va col·locar a 350 m de la costa i es va construir un dic de 300 m de diàmetre per poder contenir les aigües del voltant del punt de fuga. Per tal de prendre mesures es va col·locar una sèrie d'instruments en una extensió de fins a 650 m a sotavent; es van emprar sensors de gas a 0,9 m, 1,4 m i 2,4 m sobre el nivell del mar [39].

Per tal de poder mesurar el núvol visible es van fotografiar les fuites des de dues torres que proporcionaven una visió ortogonal i des d'un helicòpter que sobrevolava la zona. Les fotografies de l'helicòpter es van analitzar amb l'analitzador d'imatges Magiscan que va permetre llegir la posició del núvol visible [40].

*Taula 6. Condicions de la simulació dels experiments de Maplin Sands[41]*

Experiment	Maplin 27	Maplin 29	Maplin 39	Maplin 43	Maplin 46	Maplin 51	Maplin 56
Material	GNL	GNL	GNL	LPG	LPG	LPG	GNL
Durada (s)	160	225	60	330	355	-	80

<b>Velocitat vent (m/s)</b>	5,5	7,4	4,1	5,5	8,1	7	5,1
<b>Humitat (%)</b>	57	52	63	70	71	80	83
<b>Temperatura aire (°C)</b>	14,58	16,8	16,85	17,0	18,66	18,0	11,59
<b>Cabal de fuga (kg/s)</b>	22,6	29,0	33,2	19,2	23,3	46,7	17,7
<b>Rugositat (mm)</b>	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
<b>Estabilitat</b>	C-D	D	D	D	D	D	D
<b>Temperatura de rosada (°C)</b>	6,13	6,85	9,73	11,46	13,27	14,48	8,79

Per tal de mesurar els punts amb la concentració màxima es va registrar la concentració contínuament, per cada experiment es va representar en un gràfic els valors de concentració màxima a cada punt i per interpolació es va determinar les distàncies on s'assolia la concentració del LFL a una alçada aproximada de 0,9 m [39].

### 7.1.2. Burro

Els experiments de Burro es van realitzar al Naval Weapons Center (MWC) a China Lake, California, l'estiu del 1980. Consistien en una sèrie de vessaments de Gas Natural Liquefied (GNL).

En primer lloc es va realitzar un test que va consistir en un vessament de 40 m<sup>3</sup> de nitrogen líquid en aigua per desenvolupar un algoritme de correcció pels sensors infrarojos (IR). Els altres 8 tests van consistir en vessaments de 40 m<sup>3</sup> de GNL en aigua per mesurar la dispersió del núvol de vapor de GNL. Per forçar la seva sortida es va utilitzar nitrogen a pressió i es va fer evacuar el GNL per una canonada de 100 m i 25 cm de diàmetre [42]. En la majoria dels experiments van predominar els processos turbulents en la dispersió del gas excepte en l'experiment Burro 8, en el qual la velocitat del vent era baixa, 1,8 m/s, fet que va comportar un núvol més ample i baix.

Per tal de mesurar les condicions de la fuga es va col·locar 20 anemòmetres a 2 m d'alçada per mesurar la velocitat del vent i 25 estacions mesuraven la concentració del gas amb sensors a 1, 3 i 8 m d'alçada. Dels sensors utilitzats, uns mesuraven la concentració de metà i d'hidrocarburs pesats per separat i d'altres mesuraven el total d'hidrocarburs [39].

*Taula 7. Condicions de la simulació dels experiments de Burro [42]*

<b>Experiment</b>	<b>Burro 3</b>	<b>Burro 8</b>
<b>Material</b>	GNL	GNL
<b>Durada (s)</b>	166,8	107

Direcció del vent (°)	224	234
Velocitat vent (m/s)	5,4	1,8
Humitat relativa (%)	5,2	4,7
Temperatura aire (°C)	33,8	33,1
Cabal de fuga (kg/s)	88,02	113,3
Pressió (bara)	0,948	0,941
Temperatura rosada (°C)	-10,63	-12,35
Altres	Vessament sobre aigua	

### 7.1.3. Proves realitzades amb GNL per Gaz de France i amb GLP per HSL

El Health and Safety Laboratory (HSL) va realitzar una sèrie d'experiments per estudiar el comportament de fuites tipus doll de GNL i GLP, estudiant les característiques de la flama produïda quan el núvol rebia una font d'ignició. Es van realitzar estudis de fuites amb cabals superiors a 4,9 kg/s, recollint dades de temperatura i concentració del núvol resultant. Es van realitzar 6 experiments no obstruïts i 4 amb un obstacle en la direcció del flux. La canonada de descàrrega tenia una sortida a l'exterior acabada amb una vàlvula amb un d'orifici de 20 mm de diàmetre i es trobava a 1,5 m del nivell del sòl. En els casos d'experiments obstruïts es va col·locar plaques d'acer d'un metre d'altura i 20 metres d'amplada a 15 metres del punt de fuga [43].

*Taula 8. Condicions de la simulació dels experiments de HSL [43]*

Experiment	Trial 8	Trial 11	Trial 16	Trial 17	Trial 18	Trial 23
Material	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG
Durada (s)	131	141	116	160	143	51
Direcció vent	195-225	110-225	200-225	160-215	130-210	145-210
Velocitat vent (m/s)	3	5	5	2	2	2
Humitat (%)	63	63	85	75	77	84

<b>Temperatura aire (°C)</b>	14,5	17,5	17	14	14	11,5
<b>Cabal de fuga (kg/s)</b>	2,5±0,3	3,4±0,3	2,6	3	2,4	2,6
<b>Temperatura fuga (°C)</b>	11,96	11,26	12,85	12	11,1	10,38
<b>Pressió (bara)</b>	7,87	7,58	7,9	7,7	7,4	7,12
<b>Estabilitat</b>	D	D	D	D	D	D
<b>Temperatura de rosada (°C)</b>	7,51	10,34	14,45	9,62	10,01	8,88
<b>Altres</b>	No obstruït	Obstruït	Obstruït	No obstruït	No obstruït	No obstruït

#### 7.1.4. Projecte USP-UPC (Can Padró)

Un conveni entre la Universitat de Sao Paulo (USP) i la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) va permetre realitzar una sèrie d'experiments al Camp de Seguretat i Entrenament de Can Padró entre el 22 i el 25 de juliol del 2014. Aquests experiments van consistir en la formació de núvols de GLP per tal d'estudiar-ne la seva dispersió [44].

*Taula 9. Condicions de la simulació dels experiments de Can Padró [44]*

<b>Experiment</b>	<b>P25_2</b>	<b>P25_3</b>
<b>Material</b>	LPG	LPG
<b>Durada (s)</b>	40	40
<b>Direcció vent (°)</b>	185	235
<b>Velocitat vent (m/s)</b>	0,49	0,70
<b>Humitat relativa (%)</b>	86,8	87,4
<b>Temperatura aire (°C)</b>	21,2	22,5
<b>Cabal de fuga (kg/s)</b>	0,04 - 0,38	0,08 - 0,39
<b>Temperatura fuga (°C)</b>	-28,1 - 4,7	-28,41 - 10,26
<b>Pressió (hPa)</b>	993	993



<b>Estabilitat</b>	E	E
<b>Temperatura de rosada (°C)</b>	18,90	20,29

A Taula 9 s'observa que el cabal i la temperatura de fuga es troben entre un rang de valors. L'evolució de la temperatura i dels cabals introduïts a la simulació són els valors mesurats experimentalment en cada instant [25].

## 7.2. Criteris de simulació

D'acord amb el manual del programa FLACS (GexCon AS, 2013), en el cas d'una fuga tipus doll expandit ("expanded jet"), l'àrea s'ha de trobar en una única cel·la i l'àrea transversal ha de ser superior a la del jet però inferior a dues vegades la seva àrea tal que:  $A_{jet} < A_{CV} < 2 A_{jet}$ . On:

$A_{jet}$ : àrea esperada després de l'expansió a pressió ambient.

$A_{CV}$ : Àrea del volum de control del mallat.

A més a més, es recomana que la relació entre l'àrea major i la menor no superi el valor de 5 per tal d'evitar inestabilitats.

Veure annex A amb el codi d'entrada de diferents simulacions.

### 7.2.1. Condicions simulades

En les simulacions realitzades les mides del domini utilitzat i del mallat es troben a les taules adjuntes:

*Taula 10. Dimensions del domini utilitzat*

Experiment	Longitud (m)	Amplada (m)	Alçada (m)	Nombre volums de control		
				X	Y	Z
HSL 8	168	50	9	160	69	28
HSL 11	165	50	12	79	69	39
HSL 16	175	50	15	68	57	35
HSL 17	170	50	9	100	61	24
HSL 18	175	45	9	100	75	41
HSL 23	175	40	9	100	65	28
Burro 3	160	500	18	50	195	12
Burro8	100	500	10	100	400	19

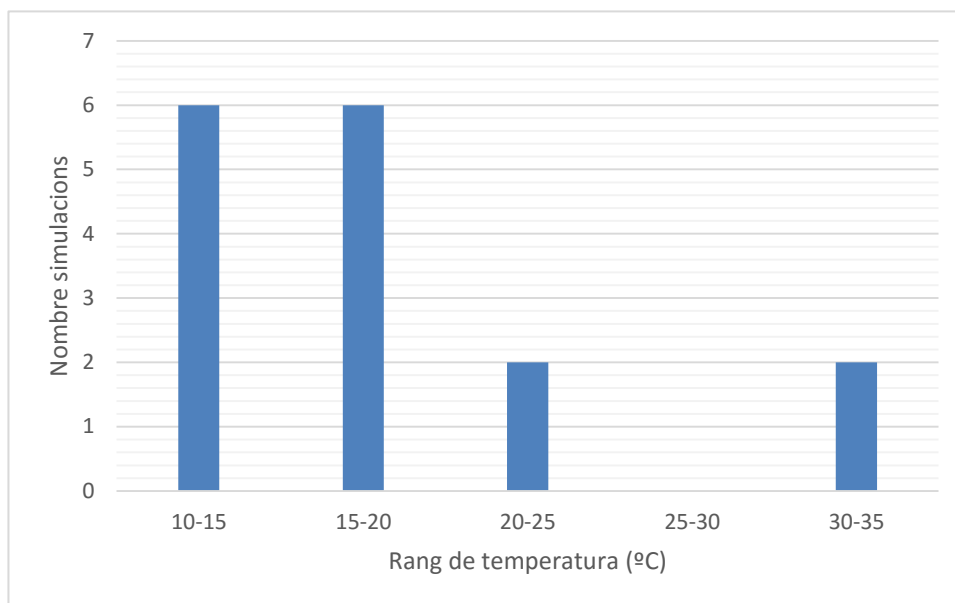
P25_2	48	24	15	37	57	77
P25_3	55	24	15	53	67	77
Maplin 27	200	870	10	234	1338	18
Maplin 29	200	850	10	128	448	10
Maplin 39	300	650	10	164	883	17
Maplin 56	80	650	10	58	444	18
Maplin 43	200	1020	10	119	451	9
Maplin 46	400	1050	10	328	490	9

Taula 11. Dimensions del mallat en les simulacions

Experiment	Mida mínima volums de control			Mida màxima volums de control		
	X	Y	Z	X	Y	Z
HSL 8	1,00	0,08	0,08	2,95	2,04	1,00
HSL 11	1,00	0,17	0,17	17,01	0,91	0,34
HSL 16	1,10	0,24	0,24	18,50	1,41	0,50
HSL 17	1,70	0,24	0,24	1,70	1,00	0,45
HSL 18	1,75	0,08	0,08	1,75	0,82	0,27
HSL 23	1,75	0,08	0,08	1,75	1,00	1,00
Burro 3	2,00	0,56	1,00	9,51	38,65	2,38
Burro8	1,00	1,20	0,10	1,00	1,20	0,55
P25_2	1,00	0,04	0,04	3,88	0,80	0,25
P25_3	0,50	0,04	0,04	5,1	1,02	0,25
Maplin 27	0,50	0,5	0,25	7,5	29,88	1,02
Maplin 29	1,00	1,00	1,00	7,41	59,77	1,00
Maplin 39	0,50	0,50	0,50	18,25	19,73	1,02
Maplin 56	1,00	1,00	0,56	3,88	30,15	0,56
Maplin 43	1,00	1,00	1,00	9,90	89,71	1,53

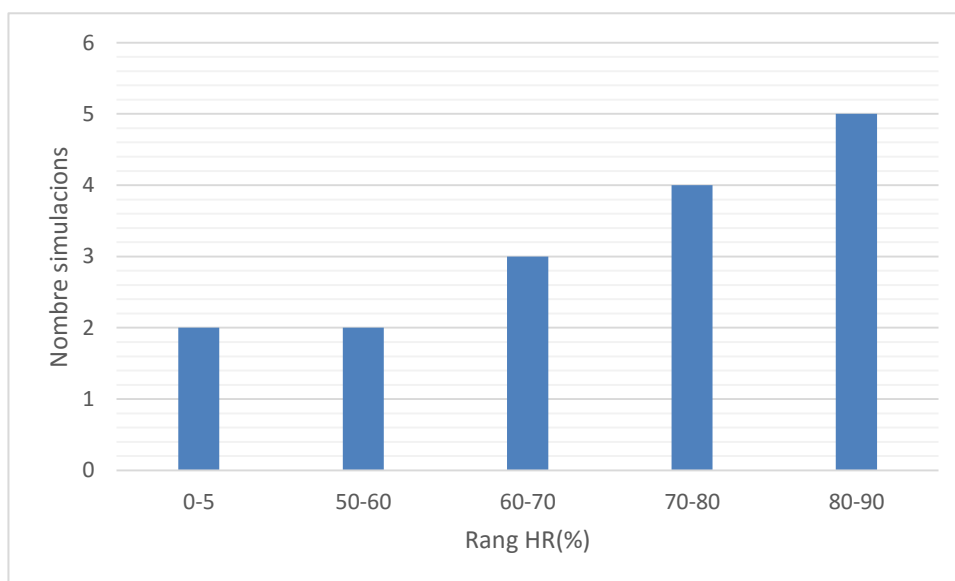
Maplin 46	1,00	1,00	1,00	7,41	89,71	1,53
-----------	------	------	------	------	-------	------

Les simulacions han permès cobrir diferents rangs de temperatura ambient, cabals de fuga, humitat relativa i temperatures de rosada.



*Figura 7. Nombre de simulacions realitzades en diferents rangs de temperatura ambient*

Tal com s'observa a la Figura 7 els rangs de temperatura ambient on s'han fet més simulacions es troben entre 10 i 20°C, temperatures ambients habituals a zones com Catalunya.



*Figura 8. Nombre de simulacions realitzades en diferents rangs d'humitat relativa*

D'acord amb la Figura 8, el rang d'humitat relativa amb més experiments es troba en humitats superiors al 60% i fins a un 90%.

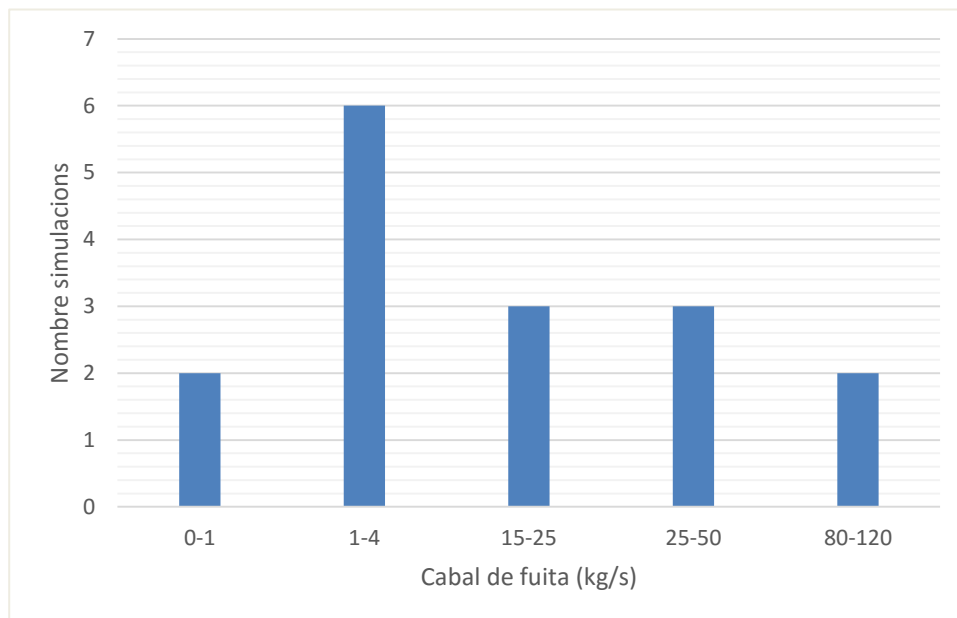


Figura 9. Nombre de simulacions realitzades en diferents rangs de cabal de fuga

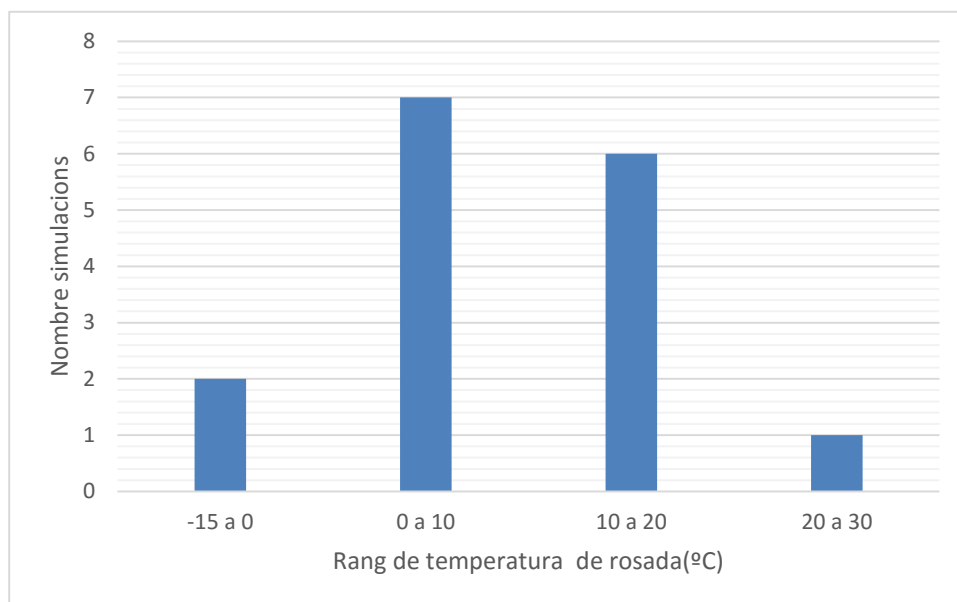


Figura 10. Nombre de simulacions realitzades en diferents rangs de temperatura de rosada

Principalment s'ha estudiat cabals de fuga petits, entre 1 i 4 kg/s, cabals que han anat associats a fuites tipus jet, en canvi, els cabals més grans de la Figura 9 fan referència a les

situacions en les quals s'ha format una bassa de gas líquat. La temperatura de rosada és una propietat funció de la humitat relativa i la temperatura ambient, en la majoria dels casos s'han trobat entre 0 i 20°C (Figura 10).

## 7.3. Resultats

### 7.3.1. Alliberament a raig a través d'un orifici

Els experiments de HSL i Can Padró es tracten de tests amb fuites a través d'un orifici.

#### **Can Padró**

En el cas dels experiments de Can Padró, s'ha obtingut les dades les dades de concentracions mesurades experimentalment en diferents punts de la instal·lació a 1,3 m d'alçada que apareixen a la tesi de A. Schleder (2015), a partir de les dades de concentració s'ha calculat interpolant la distància a on s'assoleix el Límit Inferior d'Inflamabilitat (2,1% en volum) [25]. Les dades la distància del LFL de l'experiment s'ha comparat amb les dades obtingudes a la simulació. Veure annex B amb un exemple dels gràfics obtinguts.

A partir de vídeos dels experiments P25\_2 i P25\_3 s'ha mesurat, utilitzant els punts de referència disponibles, les distàncies màximes del núvol visible en diferents moments de la fuga. Les distàncies mesurades del núvol visible no tenen gaire sensibilitat ja que ha estat difícil poder-les determinar. Coneixent la humitat relativa i la temperatura en el moment de l'experiment, s'ha calculat la temperatura de rosa, utilitzant aquestes temperatures s'ha determinat la distància del núvol visible en diferents instants.

Les distàncies experimentals i simulades de la LFL i del núvol visible de l'experiment P25\_2 es recullen a la Taula 12

*Taula 12. Distàncies simulades i reals de l'experiment P25\_2*

Temps (s)	Distància LFL experimental (m)	Distància LFL simulada (m)	Distància visible experimental (m)	Distància visible simulada (m)	% Error distància LFL	% Error distància visible
1	-	5,7	5	5,1	-	2,0
2	2,2	6,9	15	5,5	219,4	-63,3
3	4,9	7,4	15	6,1	50,1	-59,3
4	6,2	7,5	3	6,3	21,6	110,0
5	7,4	7,6	3	5,9	3,4	95,0
15	7,4	4,5	6	4,0	-38,9	-34,2
20	8,1	7,8	11	7,9	-3,7	-28,2
29	8,3	8,4	14	8,8	1,1	-37,1

A la es pot observar que l'error en la distància del LFL és major en els primers segons i que a mesura que passa el temps aquest va disminuint, en canvi l'error del núvol visible encara que també es redueix és més gran. De fet, per la distància del límit inferior d'inflamabilitat, excepte un punt, la resta de valors es poden incloure tots en un factor de dos, que segons Chan i Hanna permet validar un model.

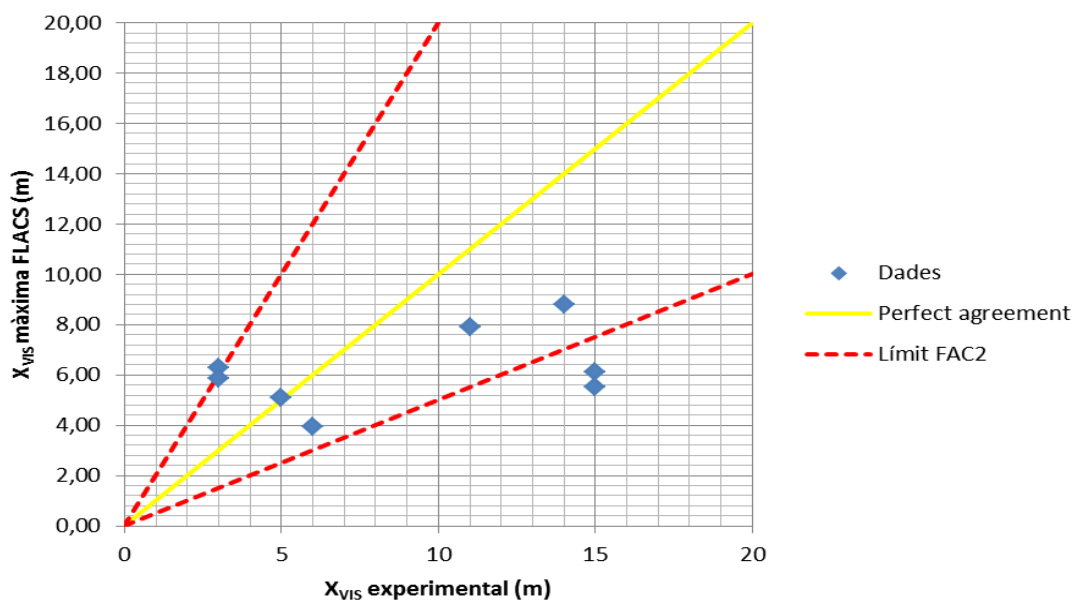


Figura 11. Relació entre la distància visible experimental i simulada per diferents temps per l'experiment P25\_2

A la Figura 11 s'observa que la majoria dels punts s'ajusten a un factor de dos, tot i així hi ha alguns punts en que la diferència entre la distància de núvol visible experimental i la simulada augmenta, però si es calcula la fracció de punts que es troben dins de la zona d'un factor de 2 és del 62,5%, superior al 50% necessari per tenir un bon model.

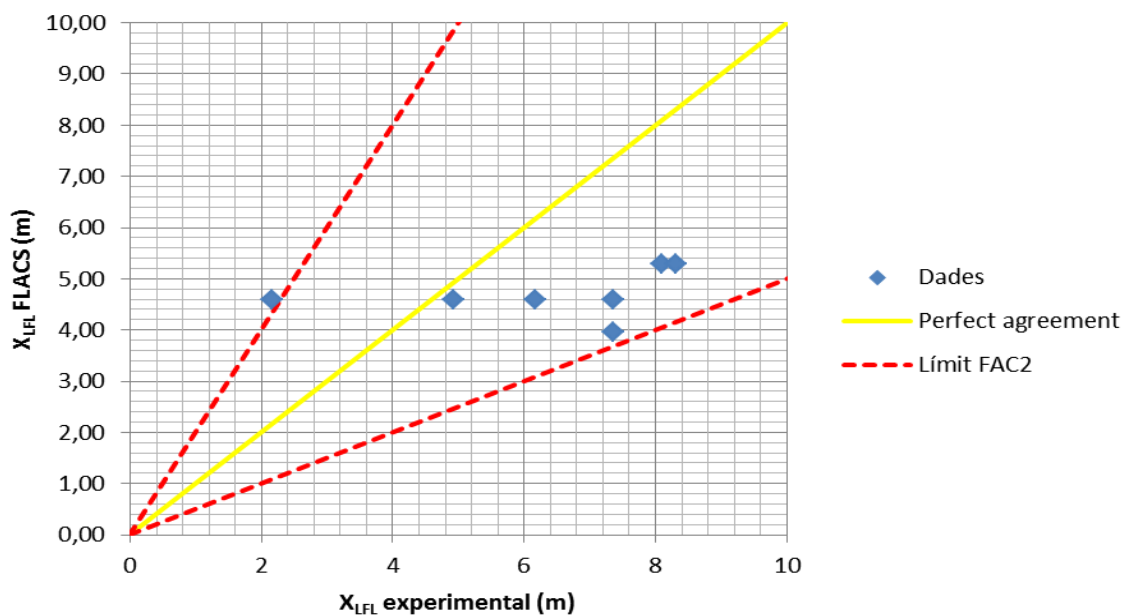


Figura 12. Relació entre la distància del LFL (Límit inferior d'inflamabilitat) simulat i mesurat experimentalment per l'experiment P25\_2

En el cas del LFL (Figura 12), l'ajust és més bo i el 85,7% de les dades s'ajusten a l'interval d'un factor de 2.

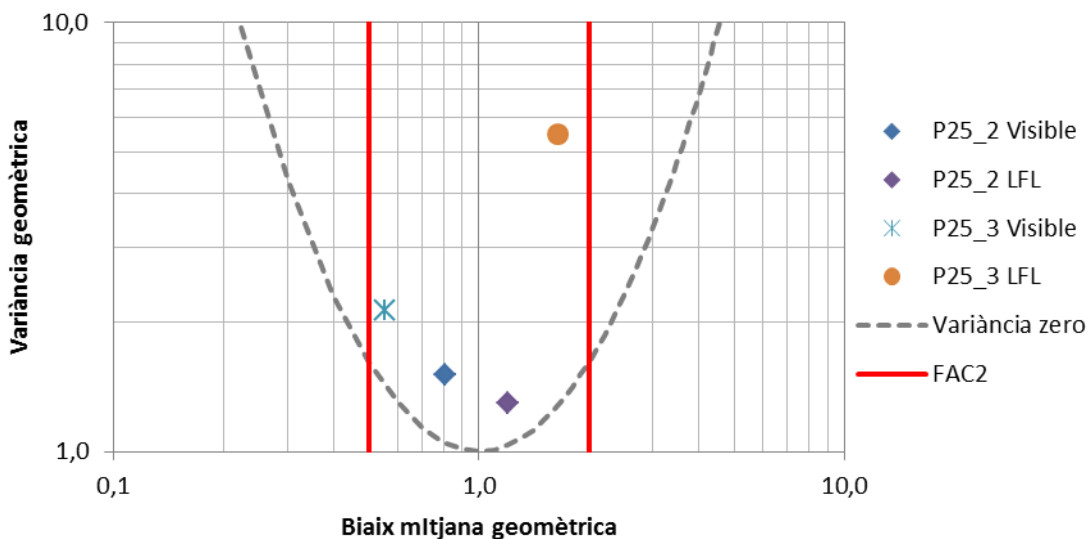


Figura 13. Relació entre la mitjana geomètrica i la variància geomètrica pels experiments P25\_2 i P25\_3

En els experiments de Can Padró en un cas s'ha tendit a predir distàncies visibles inferiors a les reals i distàncies del LFL superiors a les observades. En els quatre casos observats a la

Figura 13 els valors es mantenen dins del rang d'un factor de dos per la mitjana geomètrica.

### Experiments HSL

En el cas dels experiments de HSL es disposava de menys dades bibliogràfiques. En un informe de Butler (2001) es troben les dades de concentració de propà màximes en diferents punts, a partir d'aquestes dades s'ha determinat la distància del LFL a 1,5 metres d'alçada. Per tal d'obtenir les distàncies del núvol visible s'ha mesurat aquesta directament a partir de fotografies dels experiments. Tot i així, el fet de tenir pocs punts de referència dificulten que aquestes dades siguin molt acurades. Veure annex C. Es pot afirmar però que en l'experiment 8 el núvol visible té una distància superior a 30 m, en el 11 superior a 15 m i en l'experiment 23 superior als 25 m [43] [45].

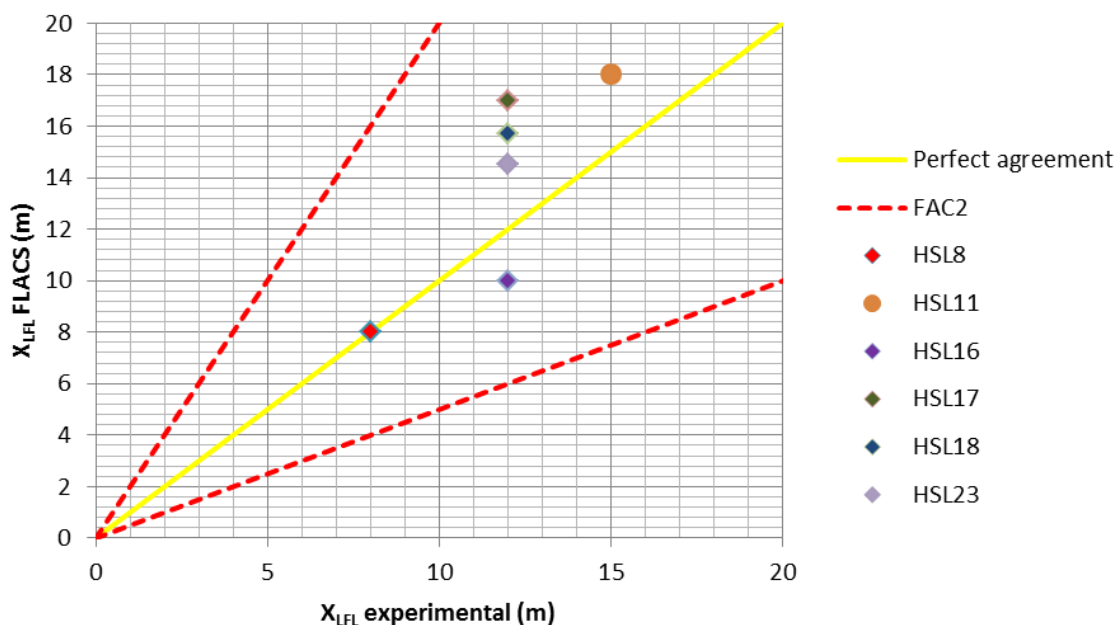
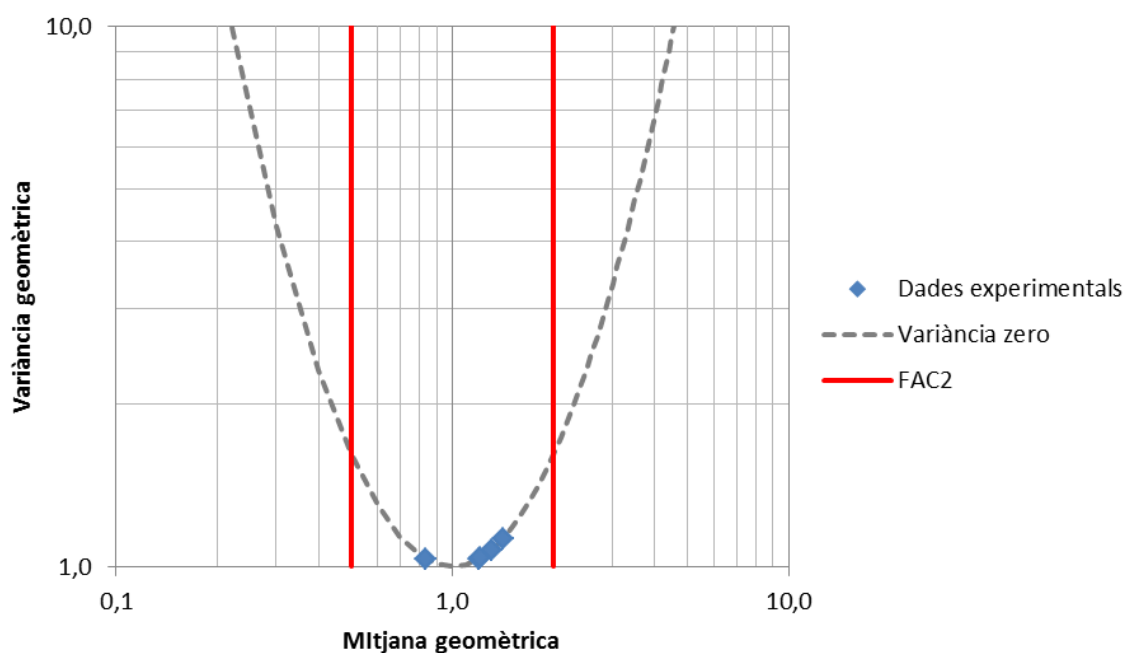


Figura 14. Distància del LFL d'experiments amb fuites a través d'un orifici

Tal i com s'observa a la Figura 14 la distància del límit inferior d'inflamabilitat mesurada i la simulada s'ajusten a un factor de 2, hi ha un error inferior al 50%, d'acord amb les afirmacions realitzades per Chang i Hanna (2004) per tal de poder validar un model de dispersió el 50% de les concentracions mesurades s'han de trobar en aquest rang. En aquest cas, totes les simulacions compleixen.





*Figura 15. Relació entre la mitjana geomètrica i la variància geomètrica de la distància del LFL per experiments d'una fuga a través d'un orifici*

Tal com es pot observar a la Figura 15 totes les dades experimentals tenen una mitjana geomètrica entre 0,5 i 2 que correspondrien a un factor de dos respecte la mitjana.

Un model perfecte tindria una mitjana geomètrica igual a 1 però no significa necessàriament que les prediccions coincideixin amb les mesures. Quan la mitjana geomètrica és superior a 1 implica que el model ha sobreestimat les concentracions i quan és inferior a 1 el contrari. En aquest cas, s'observa que en el cas de fuites a raig s'ha tendit a sobreestimar la concentració.

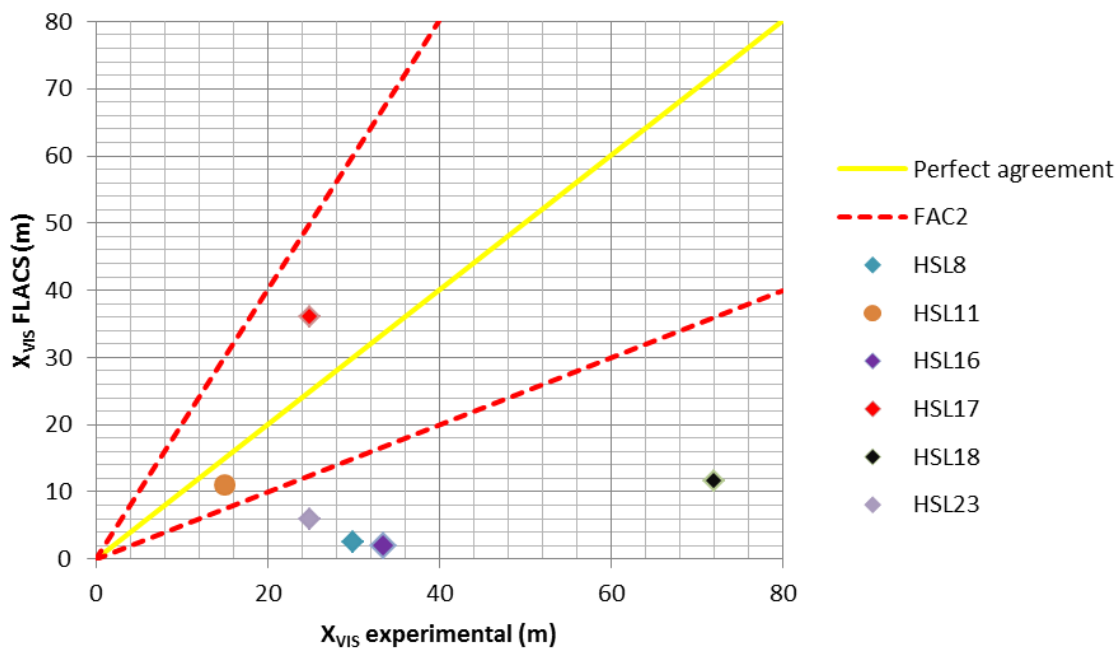


Figura 16. Relació entre la distància visible experimental i la simulada d'experiments amb fuites a través d'un orifici.

A la Figura 16 s'observa que quan el que es compara és la distància del núvol visible, aquí hi ha un error molt considerable i només dos dels experiments s'ajusten a un error inferior al 50%.

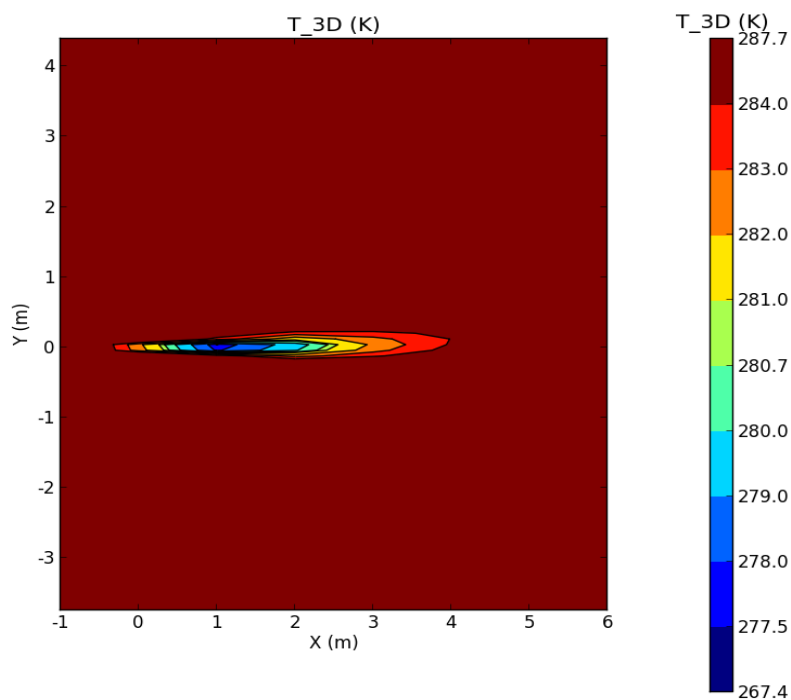


Figura 17. Perfils de temperatura simulació HSL 8 als 50 segons a 1,5 m d'alçada

Si s'observa la Figura 17, que representa els perfils de temperatura d'una de les simulacions que tenen un resultat més allunyat, es pot veure que en aquest cas el problema no és de sensibilitat del sistema. Amb les condicions de temperatura ambient i humitat de la bibliografia, la temperatura de rosada seria de 280,7 K, encara que la humitat i la temperatura fossin diferents i la temperatura de rosada fos 284 K, la distància visible només seria de 4 m, lluny dels més de 30 m que hauria de tenir. Per tant, en aquest cas el problema podria venir dels valors del vent utilitzats o de la turbulència.

### 7.3.2. Fuites de gas líquat: formació de bassals

En alguns casos quan la fuga de gas líquat arriba al sòl, es forma una bassa de líquid que va evaporant. És el cas dels experiments de Maplin i de Burro. En aquest cas s'ha analitzat la bibliografia existent per tal de determinar les distàncies on s'assoleix el LFL i s'ha comparat amb les dades obtingudes a les simulacions [41] [46] [47]. Per determinar la distància del núvol visible s'ha fet a partir de les imatges disponibles i de dades bibliogràfiques. Per determinar la distància del núvol visible a les simulacions s'ha calculat la temperatura de rosada és a la distància on s'assoleix aquesta temperatura fins on serà visible el núvol. Veure annex D.

Taula 13. Distàncies simulades i reals dels experiments de Maplin i Burro

Experiment	Distància LFL experiment al (m)	Distància LFL simulada (m)	Distància visible experiment al (m)	Distància visible simulada (m)	% Error distància LFL	% Error distància visible
Maplin 27	200	170,5	300	216,5	14,8	-27,8
Maplin 29	190	236,0	240	225,0	24,2	-6,25
Maplin 39	130	122,0	200	121,3	-6,2	-39,37
Maplin 56	110	202,5	260	243,0	84,1	12,31
Maplin 43	215	226,0	120	133,3	5,1	11,1
Maplin 46	245	208,0	-	-	-15,1	-
Burro 3	240	240,0	-	-	-5,9	-
Burro 8	420	414,54	120	90,0	-1,30	-25,0

A la Taula 13 es pot observar la diferència dels resultats simulats respecte dels valors bibliogràfics, en tots els casos excepte per Maplin 39 l'error en la distància visible és inferior al 30%, essent sempre inferior al 50%. En aquesta sèrie d'experiments el fet que es tracti de distàncies més grans ha ajudat a disminuir l'error ja que petites diferències en la temperatura de rosada tenen un menor pes en el total de la distància visible. Pel cas de la distància del LFL l'error excepte en el cas de Maplin 56 és inferior al 25% en tots els casos.

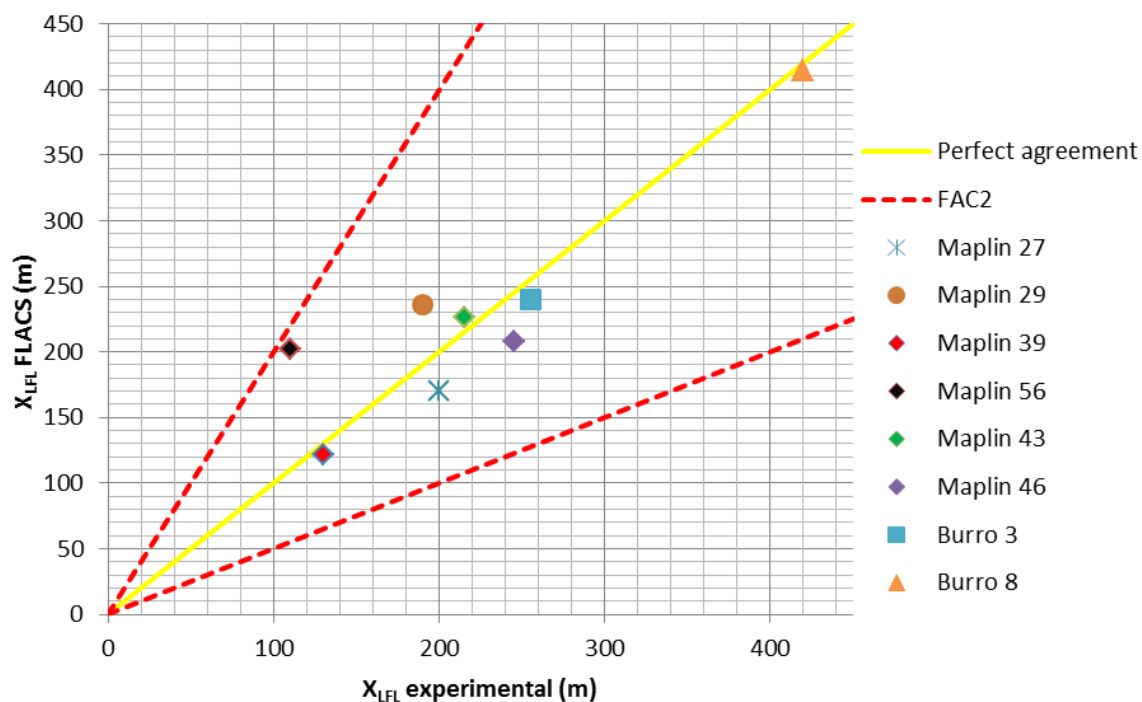


Figura 18. Relació entre la distància simulada on hi ha una concentració igual al LFL i l'experimental pels experiments de Maplin

Tal com s'observa a la Figura 18 les distàncies del límit inferior d'inflamabilitat s'ajusten a un factor dos en tots els casos.

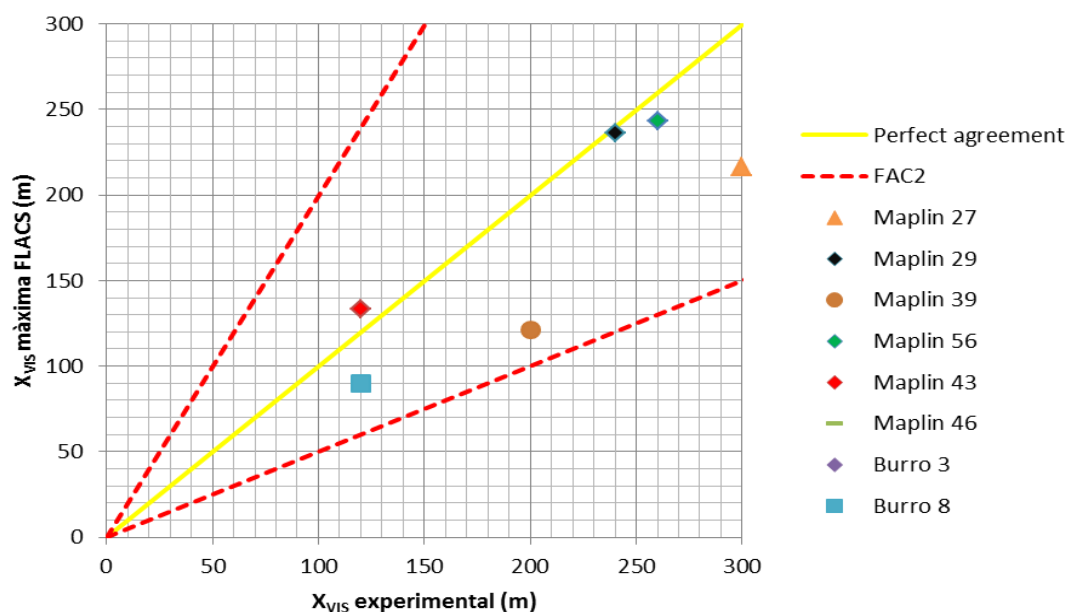


Figura 19. Relació entre la distància visible simulada i l'experimental pels experiments de Maplin

A la Figura 19 s'ha representat la distància visible, determinada a la distància on la temperatura és igual a la temperatura de rosada (calculada a partir de les condicions d'humitat i temperatura per cada experiment) i els valors de distància observada experimentalment que es poden trobar a la bibliografia. En tots els casos s'observa que s'ajunten a un factor dos.

### 7.3.2.1. Anàlisi sensibilitat

Per poder determinar com afecta la mesura de la temperatura ambient i la humitat en la distància visible, s'ha calculat la variació de la temperatura de rosada a causa de diferents valors de temperatura ambient i d'humitat de l'experiment de Maplin 56.

Taula 14. Variació de la temperatura de rosada a causa de la variació de la humitat relativa

Humitat relativa (%)	Temperatura ambient (°C)	Temperatura de rosada (°C)
80	11,59	8,25
81	11,59	8,43
82	11,59	8,61
83	11,59	8,79
84	11,59	8,97
85	11,59	9,14

*Taula 15. Variació de la temperatura de rosada a causa de la variació de la temperatura ambient*

Temperatura ambient (°C)	Humitat relativa (%)	Temperatura de rosada (°C)
8,0	83	5,28
9,0	83	6,26
10,0	83	7,24
11,0	83	8,21
11,6	83	8,79
12,0	83	9,19
13,0	83	10,17
14,0	83	11,15

Com es pot observar a la Taula 14, un error en la mesura de la humitat relativa del 2% suposa un error en la temperatura de rosada inferior a mig grau. En canvi, tal com s'observa a la Taula 15, una diferència d'un grau en la mesura de la temperatura ambient suposa una diferència de gairebé un grau en la temperatura de rosada. Les petites variacions de temperatura ambient que pot haver-hi a l'espai on s'ha realitzat l'experiment poden causar una diferència entre la distància visible a l'experiment i la distància simulada. Per exemple, A la Figura 20 s'observa que, per l'experiment Maplin 56, una diferència de temperatura d'un grau centígrad al voltant del punt de temperatura de rosada, suposa una variació en la distància visible d'aproximadament 40-50 metres, fet que suposaria passar a tenir un error en la distància del núvol visible del 30%.

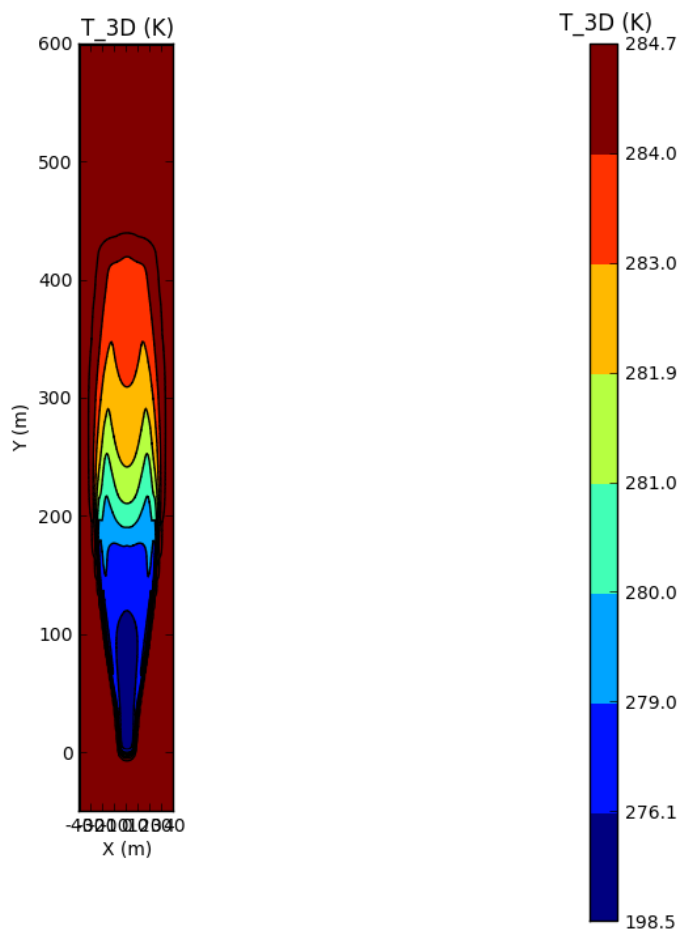


Figura 20. Perfils horitzontals de temperatura de Maplin 56 als 120 segons i a 0,83 m d'alçada.

### 7.3.3. Conclusions de la validació del programa FLACS

A partir de la validació del programa FLACS s'ha arribat a una sèrie de conclusions:

- S'ha simulat unes condicions des d'humitats relatives baixes (aproximadament 5%) fins a humitats relatives altes del 90% i des de 10 °C a 35 °C. Tot i això, a la validació principalment s'ha estudiat humitats relatives entre el 60 i el 90% i temperatures entre 10 i 20 °C.
- En els experiments de Can Padró i HSL es tracta de fuites tipus dard i a Maplin i Burro es tracta de bassals. Mitjançant aquest estudi es dona per bona la utilització del programa FLACS per estudiar la distància del Límit Inferior d'Inflamabilitat i de la distància del núvol visible en l'estudi de fuites que provenen d'un bassal. El model es dona per vàlid perquè en tots els casos les dades s'ajusten a un factor de dos i els errors en la majoria dels casos són baixos, inferiors del 25 %. A més, s'ha obtingut

una mitjana geomètrica pròxima a 1.

- No es dóna per vàlida la utilització del programa FLACS per determinar la distància del núvol visible de fuites tipus “jet”, on el gas surt en forma de dard, ja per l'experiment HSL la majoria de les dades es troben fora d'un factor de 2. Seria necessari disposar de més dades experimentals de distància del núvol visible per poder comparar les dades simulades amb les reals.
- En el cas de jets si que es dóna per bona la utilització del programa FLACS per tal de determinar la distància on s'assoleix el LFL ja que en tots els casos l'ajust ha estat bo, obtenint un 100% de les dades ajustades en un factor de 2.



## 8. Disseny experimental

### 8.1. Condicions simulades

Per tal d'estudiar les variables que afecten al factor DSF s'ha estudiat la dispersió de bassals de gasos liquats mitjançant simulacions amb el programa FLACS de fuites de GNL (format per un 95% de metà i un 5% d'età) i de fuites de propà, d'un bassal de 5 m de diàmetre amb una classe d'estabilitat segons Pasquill tipus D.

Les variables que s'han variat són:

- Cabal de fuga: 15 kg/s o 120 kg/s.
- Temperatura ambient: 5 o 40°C.
- Velocitat del vent: de 2 m/s a 25 m/s agafant punts entremitjos.
- Humitat relativa: del 5% al 100%.

Les 48 fuites simulades tenien una durada de 30 s i començaven als 5 s per permetre establitzar el perfil de velocitats del vent.

*Taula 16. Condicions utilitzades en les simulacions*

Paràmetres	Valor
Cabal (kg/s)	15 i 120
Temperatura ambient (°C)	5 i 40
Velocitat del vent (m/s)	2 a 25
Humitat relativa (%)	5 a 100
Classe d'estabilitat segons Pasquill	D
Diàmetre bassal (m)	5
Tipus de sòl	Rural
Radiació solar (W/m <sup>2</sup> )	250

Al programa FLACS s'ha simulat els següent domini:

*Taula 17. Volum simulat*

Experiment	Longitud (m)	Amplada (m)	Alçada (m)	Nombre volums de control		
				X	Y	Z
GNL	910	160	10	485	110	17

Propà	810	160	10	484	110	19
-------	-----	-----	----	-----	-----	----

Per evitar que els resultats depenguessin de la mida del mallat s'ha utilitzat un mallat suficientment petit per evitar que aquest afecti al resultat. Les mides utilitzades són les recomanades pel propi desenvolupador del programa, les utilitzades en validacions d'altres autors i similars a les validacions del programa realitzades. Una mida de mallat més petit hauria comportat una demanda de computació massa elevada i per tant s'ha descartat.

*Taula 18. Mides dels volums de control de les simulacions*

Experiment	Mida mínima volums de control (m)			Mida màxima volums de control (m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
GNL	1,00	0,50	0,13	66,76	6,14	1,54
Propà	1,00	0,50	0,13	51,94	6,14	1,53

## 9. Resultats

En aquest capítol s'ha estudiat quines variables afecten en el càlcul del factor de seguretat DSF per fuites de GNL i propà i posteriorment s'ha modelitzat els resultats obtinguts per tal de facilitar una forma simple i ràpida de calcular aquest factor a partir de dades mesurables pels serveis d'emergència. Veure annex E amb els resultats.

### 9.1. Efecte de les variables analitzades

Con ja s'ha comentat, l'objectiu d'aquest treball és determinar un factor de seguretat DSF per fuites de GNL i de propà, per això en primer lloc s'ha analitzar l'efecte de les 4 variables estudiades. S'ha creat un disseny factorial per determinar la seva significança i quin efecte tenien en el factor DSF.

- Cabal: 15 kg/s o 120 kg/s.
- Temperatura ambient: 5 o 40°C.
- Velocitat del vent: 2 m/s o 10 m/s.
- Humitat relativa: 5% o 90%.

#### 9.1.1. GNL

En primer lloc s'ha estudiat l'efecte de les diferents variables en el valor del factor DSF pel GNL.

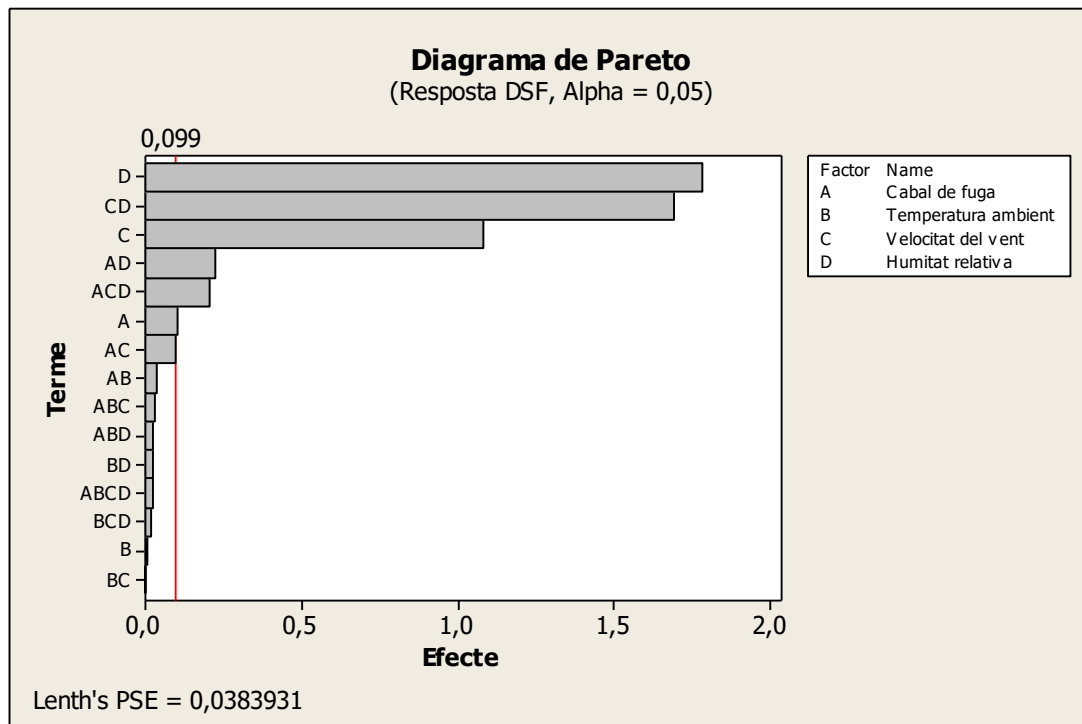


Figura 21. Diagrama de Pareto de les variables que afecten el valor DSF en una fuga de GNL

Tal com s'observa a la Figura 21 la variable que té un pes més important en l'estudi del DSF d'una fuga és la humitat relativa. La humitat relativa determina la temperatura de rosada, fet que permetrà observar el núvol a major o menor distància. L'altra variable que té un efecte més important és la velocitat del vent, els valors de DSF augmenten com major és la velocitat del vent. També es pot observar que tenen un efecte significatiu les interaccions entre la velocitat del vent i la humitat relativa i les interaccions cabal de fuga-humitat relativa i cabal de fuga-velocitat del vent-humitat relativa. Això indica que el cabal de fuga també té un cert efecte en el valor de DSF encara que no és tant important com el que poden tenir les altres dues variables.

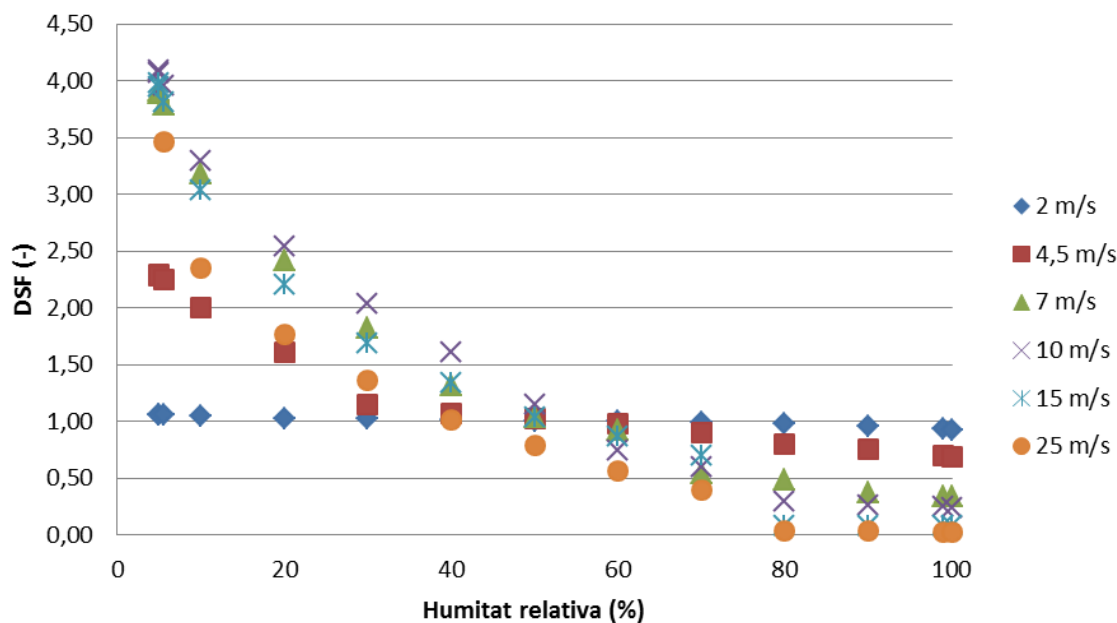


Figura 22. Efecte de la velocitat del vent en el factor DSF en funció de la humitat relativa per una fuga de GNL de 15 kg/s a 5 °C.

Estudiant l'efecte de la velocitat del vent en el factor DSF, tal com es pot observar a la Figura 22 es pot determinar que a velocitats baixes, independentment de la humitat relativa, el valor del factor de seguretat DSF es manté aproximadament estable, en aquest cas a un valor pròxim a 1. A mesura que la velocitat del vent va augmentant, el factor DSF adquireix valors superiors a 1 quan la humitat relativa és baixa i valors inferiors a 1 quan la humitat relativa és superior al 40-50%. Si la velocitat del vent segueix augmentant, a partir dels 15 m/s o 20 m/s, el factor DSF torna a disminuir però manté una tendència semblant.

En cas que el cabal de fuga sigui de 120 kg/s com a la Figura 23, es segueix la mateixa tendència, tot i així en aquest cas a 4,5 m/s la variació en funció de la humitat relativa és menor.

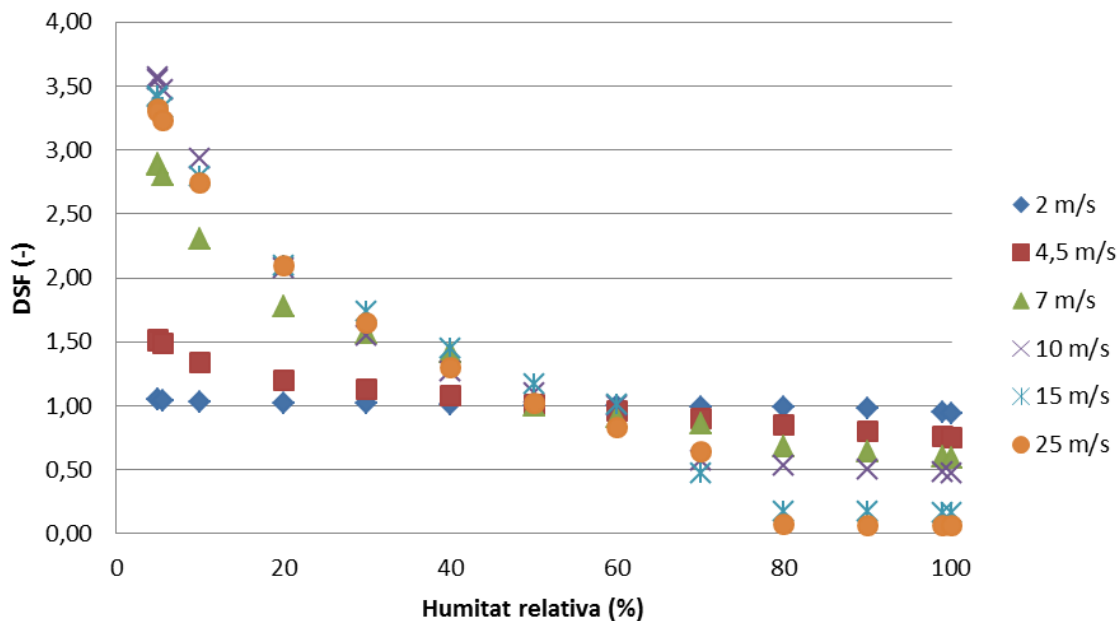


Figura 23. Efecte de la velocitat del vent en el factor DSF en funció de la humitat relativa per una fuga de GNL de 120 kg/s a 5 °C

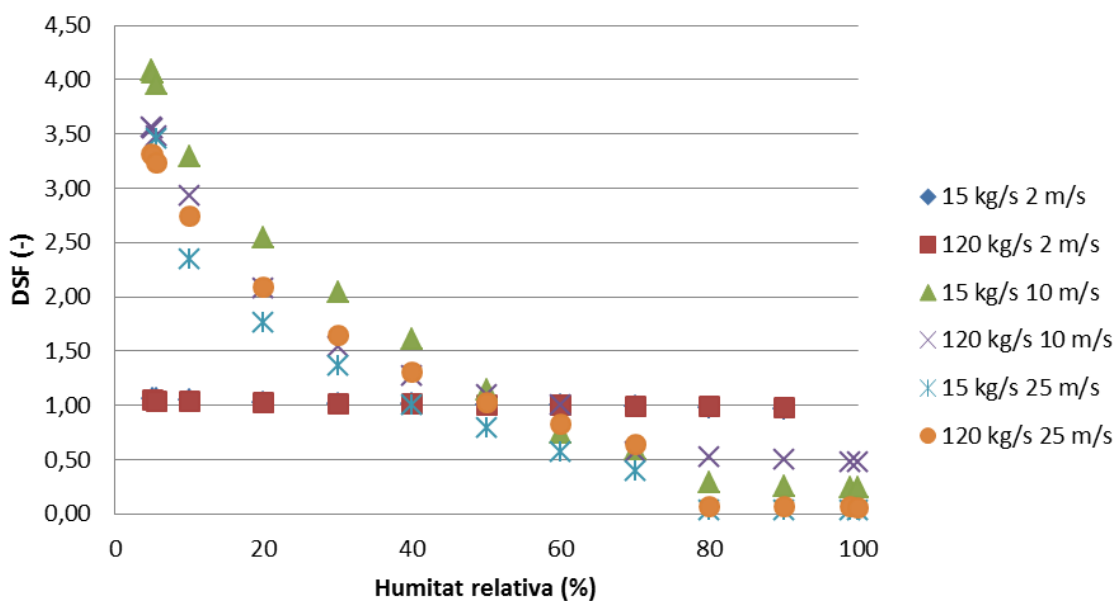


Figura 24. Factor DSF per diferents cabals de fuga en diferents casos de velocitat del vent

Observant la Figura 24 es pot veure que al variar el cabal de fuga, el factor DSF no es veu gaire afectat, tot i així, quan el cabal de fuga és major, també ho és el factor DSF.

S'ha estudiat la diferència entre els 4 casos estudiats (15 kg/s i 5°C, 15 kg/s i 40°C, 120 kg/s i 5°C i 120 kg/s i 40°C) representant la desviació estàndard relativa entre elles.

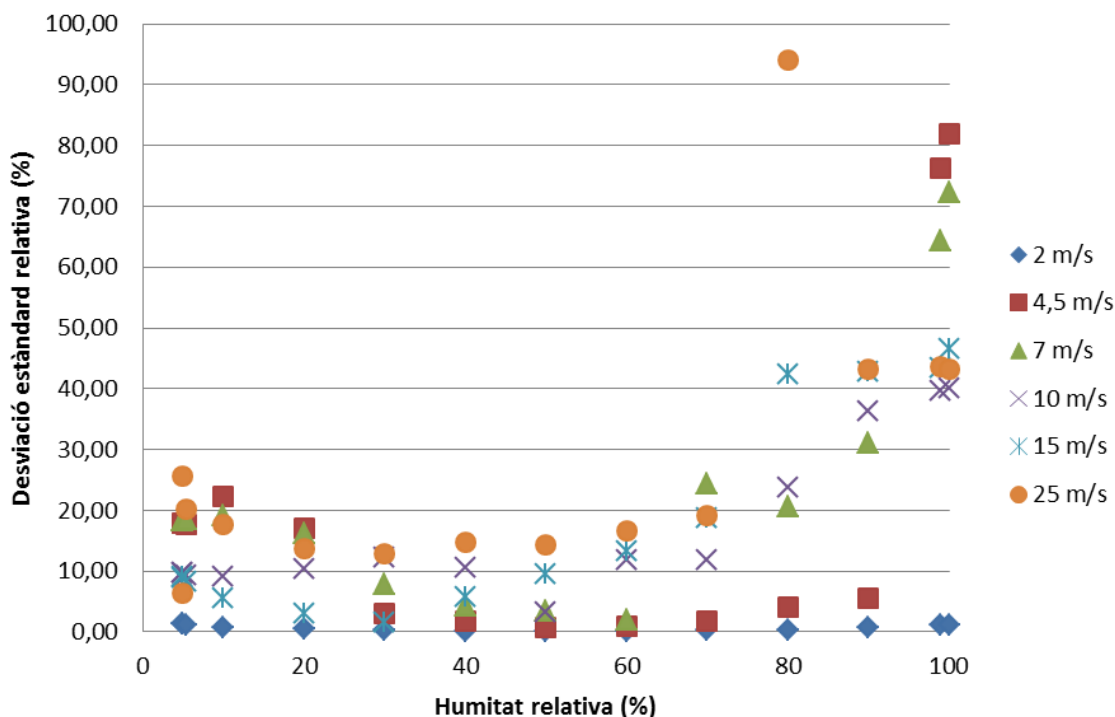


Figura 25. Desviació estàndard relativa dels 4 casos estudiats (15 kg/s i 5°C, 15kg/s i 40°C, 120 kg/s i 5 °C i 120 kg/s i 40°C) per una fuga de GNL

Com menor és la velocitat del vent, menor és la desviació estàndard relativa, a més, quan la humitat relativa es troba entre el 10 i el 70%, és inferior al 20% en tots els casos. Quan la humitat relativa és molt alta, les diferències al canviar les condicions de cabal i temperatura augmenten, sobretot quan la humitat relativa és pròxima al 100%. Quan la humitat relativa és del 100%, la temperatura de rosada és la temperatura ambient, per tant no es pot determinar amb claredat la zona visible i això fa els valors de la distància visible determinats no siguin fiables.

### 9.1.2. Propà

També s'ha estudiat quines variables afecten al factor DSF pel propà.

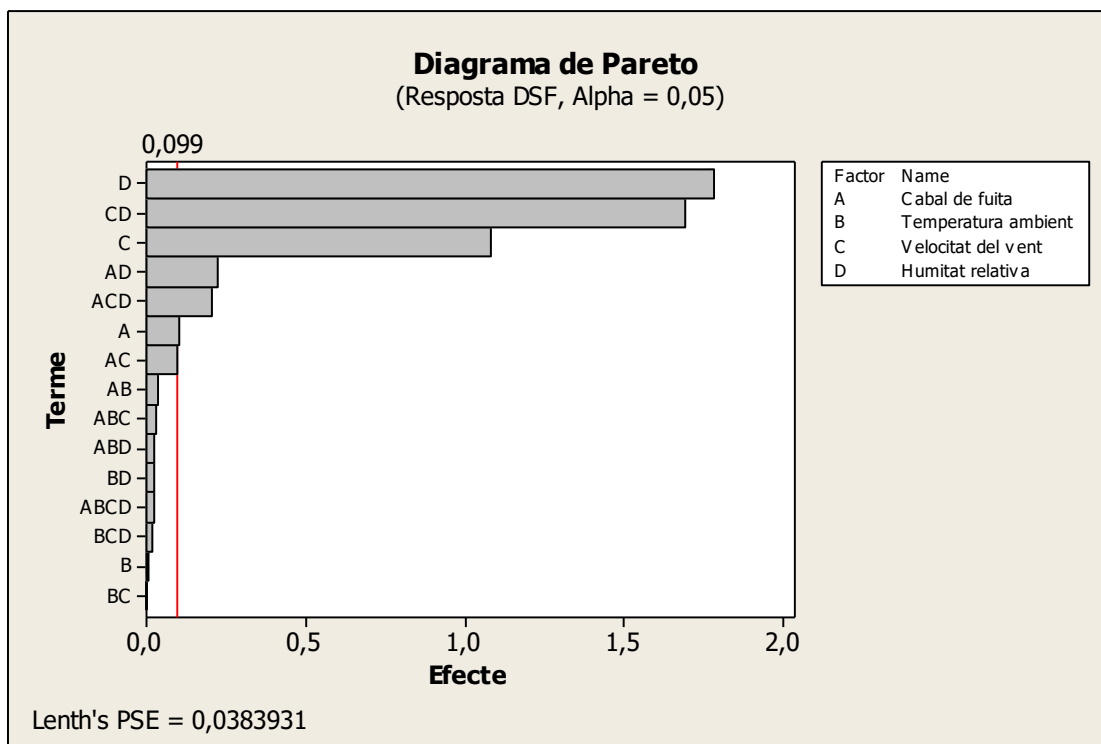


Figura 26. Diagrama de Pareto de les variables que afecten al valor de DSF en una fuga de propà

Tal i com s'observa a la Figura 26, de la mateixa manera que en el cas del GNL, la variable que té un pes més important és la humitat relativa juntament amb la velocitat del vent i la interacció d'aquestes dues variables.

A més, les interaccions cabal de fuga-humitat relativa i cabal de fuga-velocitat del vent-humitat relativa també són significatius.

Si es representa el valor del factor DSF per diferents valors de velocitat del vent i d'humitat relativa com a la Figura 27, s'observa que quan la humitat relativa és alta, independentment de la velocitat del vent s'assoleixen valor semblants, aquests són valors baixos, pròxims a la unitat quan la humitat relativa és del 80%. A mesura que la humitat relativa disminueix el factor DSF augmenta, a més, com més gran és la velocitat del vent, major és el factor DSF. Al gràfic no es pot observar valors més baixos del 30% d'humitat per les velocitats de 15 i 25 m/s perquè no va ser possible determinar-los ja que les temperatures de rosada necessàries són més baixes que les observades a la simulació. Això pot ser perquè en aquestes circumstàncies no s'observaria un núvol visible o perquè el mallat no era suficientment petit i per tant no es podia observar els punts més pròxims al punt de fuga. Tot i això, empetir el mallat en aquest punt hauria suposat una capacitat de càlcul massa gran.



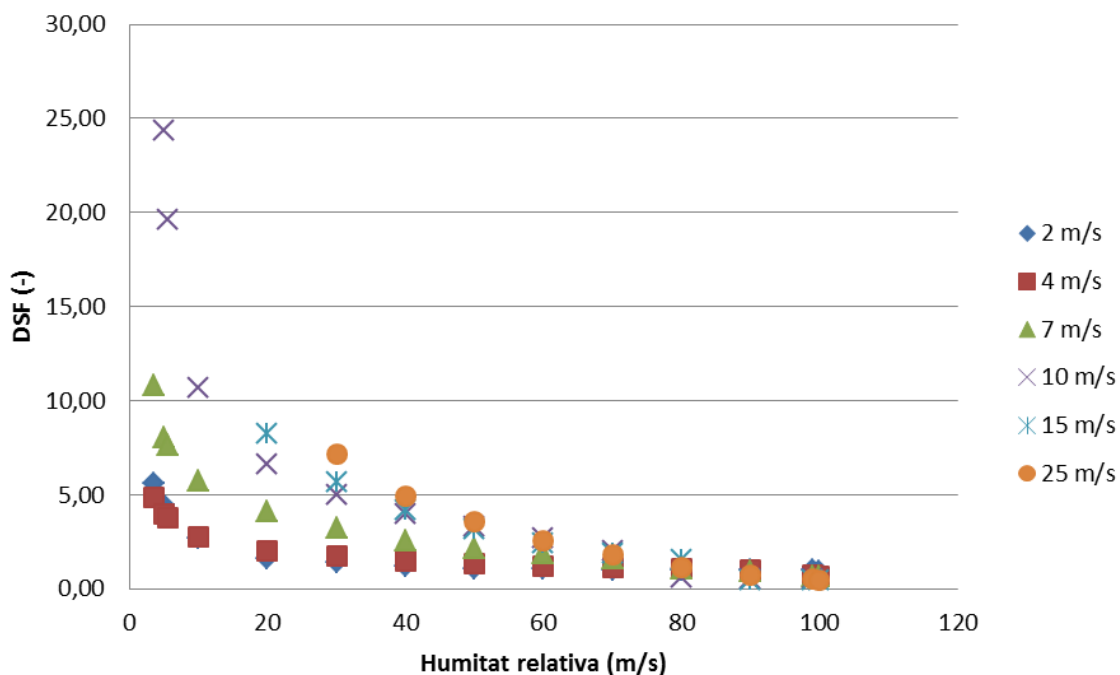


Figura 27. Efecte de la velocitat del vent en el factor DSF en funció de la humitat relativa per una fuga de propà de 15 kg/s a 5 °C.

Canviant el cabal de la fuga s'observa una tendència semblant però amb algunes diferències. En primer lloc, la simulació a una velocitat del vent de 7 m/s no compleix la tendència i s'obtenen valors del factor DSF molt més elevats que amb velocitats del vent superiors. En la resta de casos es compleix el comentat anteriorment.

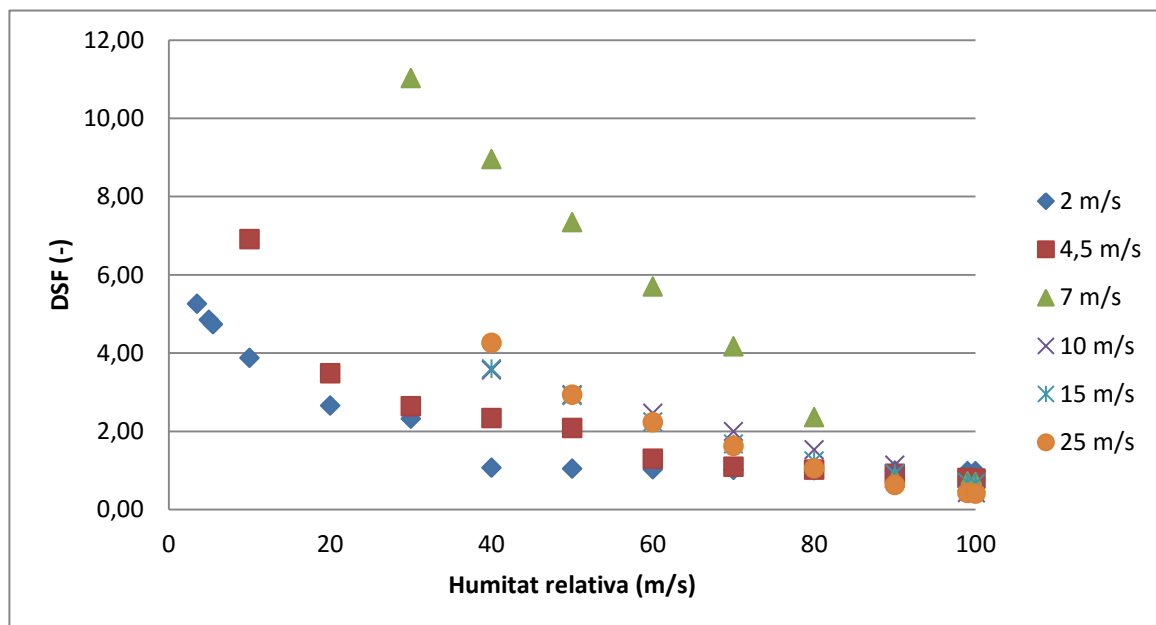


Figura 28. Efecte de la velocitat del vent en el factor DSF en funció de la humitat relativa per una fuga de propà de 120 kg/s a 5 °C.

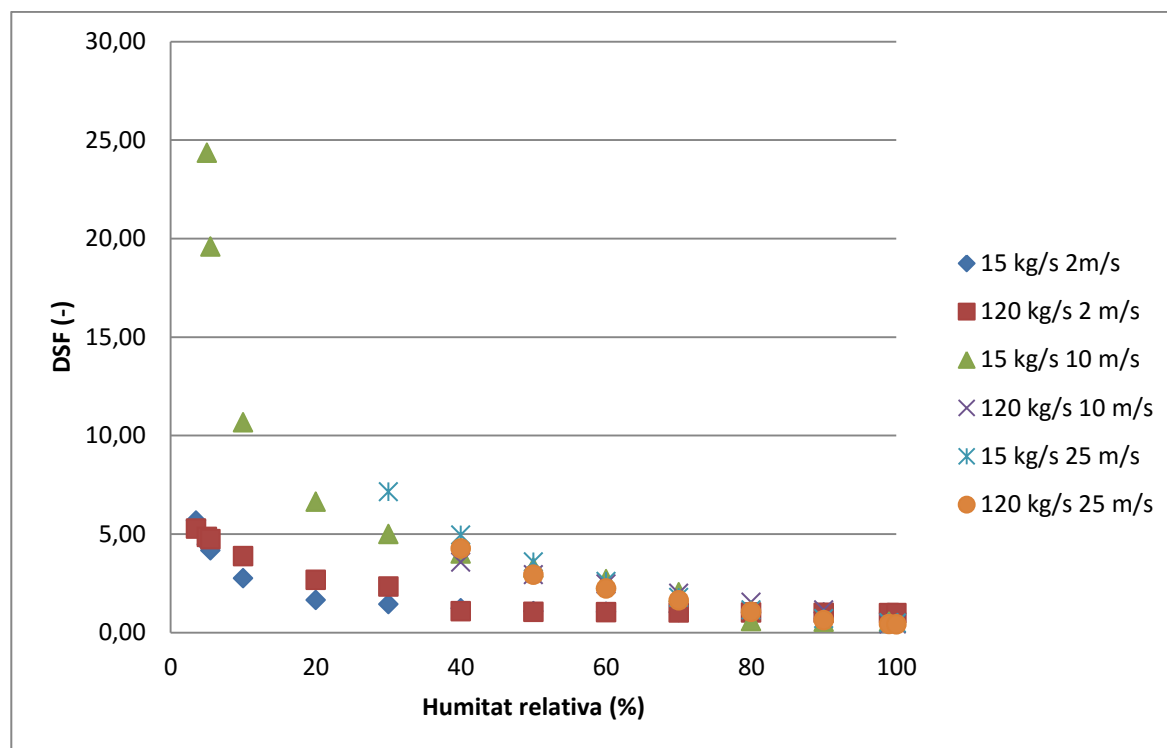


Figura 29. Factor DSF per diferents cabals de fuga en diferents casos de velocitat del vent

Per observar l'efecte del cabal de fuga s'ha estudiat diferents casos amb dos cabals diferents, en els casos representats a velocitats baixes al augmentar el cabal de fuga augmenta el factor DSF però al augmentar la velocitat aquest augment no és tant clar.

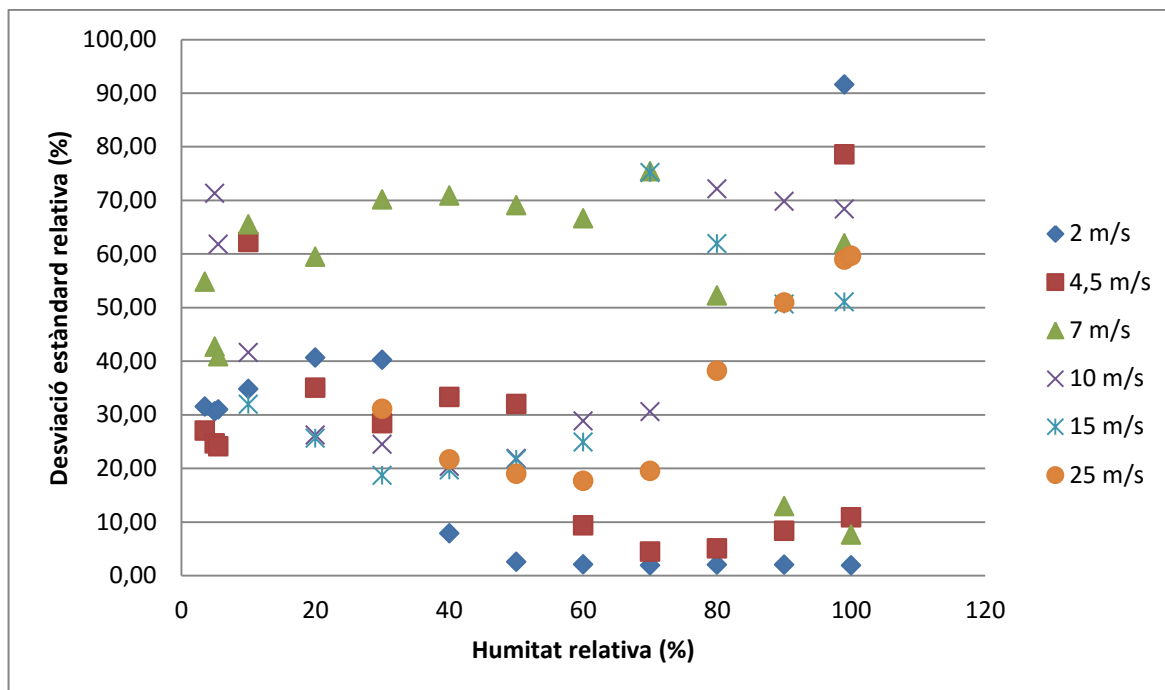


Figura 30. Desviació estàndard relativa dels 4 casos estudiats (15 kg/s i 5°C, 15kg/s i 40°C, 120 kg/s i 5 °C i 120 kg/s i 40°C) per una fuga de propà

Comparant la desviació estàndard relativa dels diferents casos de cabal de fuga i temperatura ambient estudiats, s'observa molta variabilitat, sobretot en els casos on la velocitat del vent és més alta. Això indica que el cabal de fuga afecta al factor DSF ja que s'obtenen desviacions estàndard relatives superiors al 20% en la majoria dels casos, sobretot als extrems, i per tant serà necessari estimar-lo per poder determinar un factor de seguretat.

## 9.2. Factor de seguretat DSF pel GNL

Com que anteriorment s'ha observat que l'efecte del cabal de fuga i de la temperatura ambient no era significatiu en el cas de fuites de GNL, s'ha obtingut una superfície de resposta del factor de seguretat DSF en funció de la velocitat del vent i la humitat relativa. Aquestes dues variables són fàcilment mesurables pels serveis d'emergència quan es produeix una fuga i amb aquesta correlació, es podrà establir fàcilment una zona segura.

La possibilitat de determinar ràpidament si el factor de seguretat DSF és superior o inferior a la unitat és important ja que si és inferior a 1, la zona amb una concentració superior al límit inferior d'inflamabilitat es trobarà dins de la zona visible, en cas contrari, la zona inflamable s'estendrà més enllà de la zona visible.

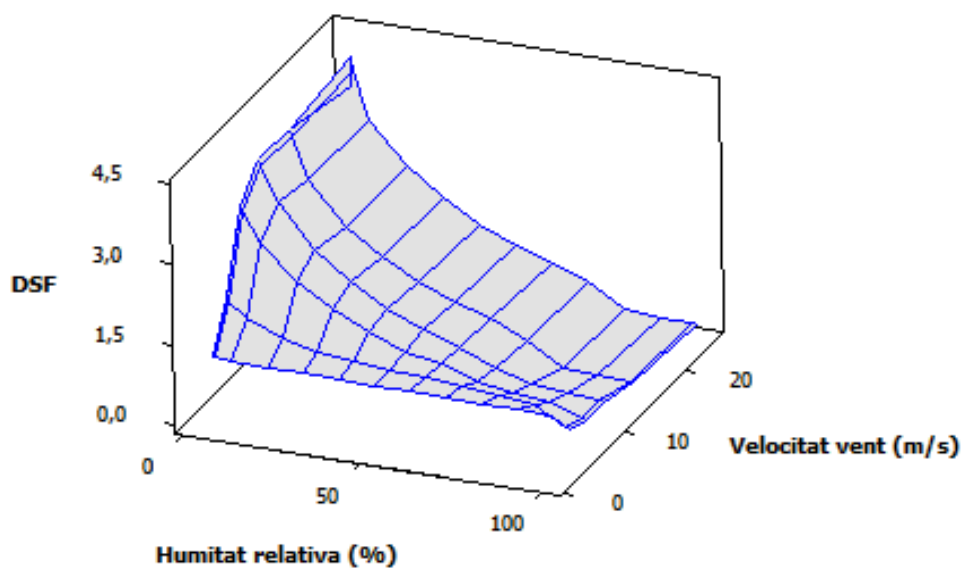


Figura 31. Superfície de resposta del factor de seguretat DSF per fuites de GNL en funció de la humitat relativa i la humitat del vent

Tal i com s'observa a la Figura 31 quan la humitat relativa és baixa, el factor DSF és més elevat que a humitats elevades, per tant quan la humitat ambiental és baixa, els cossos d'emergència hauran d'extremar les precaucions i allunyar-se o crear una zona segura fins més enllà de 4,5 vegades la distància de núvol visible. Al augmentar la velocitat del vent aquest coeficient DSF augmenta més si la velocitat és baixa. Tot i així, quan la humitat és alta, el valor de DSF es manté bastant estable.

S'ha ajustat la superfície de resposta al següent polinomi:

$$\begin{aligned} \text{DSF} = & 1,71116 + 0,184504 \cdot v_{\text{vent}} - 0,0412788 \cdot \text{HR}(\%) - 0,00346027 \cdot v_{\text{vent}}^2 \\ & + 0,000302601 \cdot \text{HR}(\%)^2 - 0,00144865 \cdot v_{\text{vent}} \cdot \text{HR}(\%) \end{aligned}$$

Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 0,41$  i un ajust del 86,57%.

On:

DSF: Factor de Seguretat de la Dispersió (-)

$v_{\text{vent}}$ : velocitat del vent (m/s)

HR(%): Humitat relativa (%)

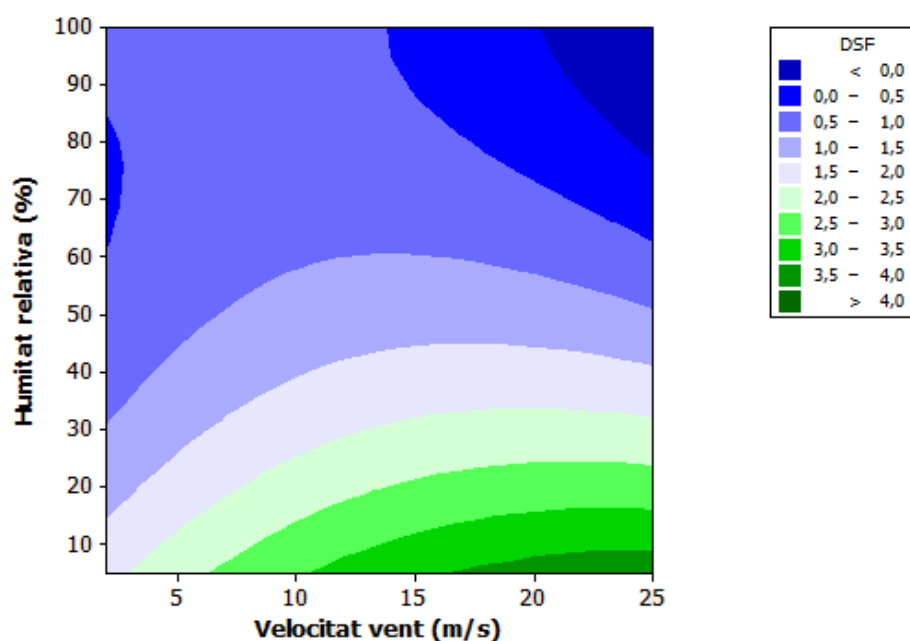


Figura 32. Gràfic de contorn del factor DSF en una fuga de GNL en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Observant més detingudament els contorns del factor DSF, es determina que quan la humitat relativa és superior al 30% per velocitats del vent baixes i superior al 50% quan la velocitat del vent és alta, el factor DSF és inferior a la unitat. En aquests casos la zona inflamable es trobarà dins de la zona visible. A la figura s'observa algunes zones on DSF és inferior a 0, això és degut a la falta de dades en aquestes zones.

En casos d'emergències, no només és interessant conèixer la distància del límit inferior d'inflamabilitat sinó que pot ser interessant conèixer la distància on arriba el 50% del LFL, aquesta s'anomena la zona d'intervenció, per això es proposa un altre factor,  $DSF_{50\%}$ , que relaciona la distància on s'assoleix el 50% del LFL amb la distància visible.

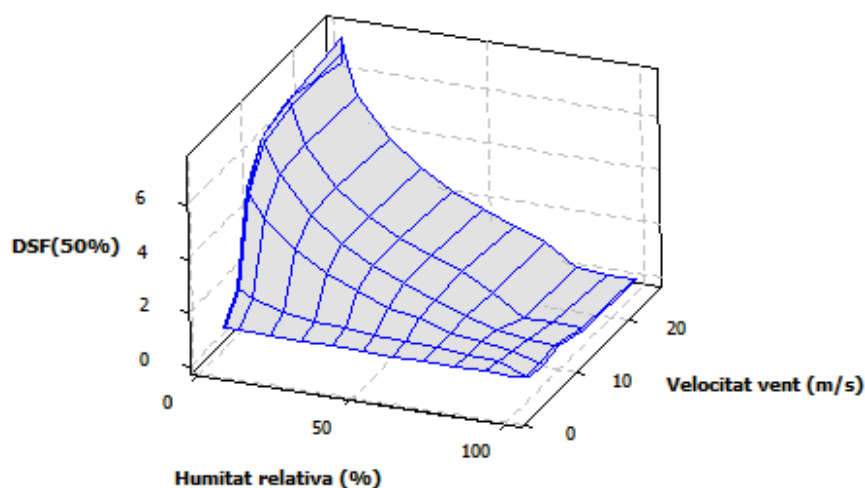


Figura 33. Superfície de resposta del factor de seguretat  $DSF_{50\%}$  per fuites de GNL en funció de la humitat relativa i la humitat del vent

Tal com ha succeït en el cas del factor DSF, el factor  $DSF_{50\%}$  té un comportament semblant, a velocitats del vent baixes es veu lleugerament afectat per la diferència d'humitat però a mesura que la velocitat del vent augmenta es produeix un màxim del seu valor quan la humitat relativa és molt baixa.

S'ha ajustat la superfície de resposta al següent polinomi:

$$DSF_{50\%} = 1,66194 + 0,477805 \cdot v_{\text{vent}} - 0,06725658 \cdot HR(\%) - 0,00960737 \cdot v_{\text{vent}}^2 \\ + 0,000529384 \cdot HR(\%)^2 - 0,00290261 \cdot v_{\text{vent}} \cdot HR(\%)$$

Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 0,75$  i un ajust del 87,03%.

On:

$DSF_{50\%}$ : Factor de Seguretat de la Dispersió, relaciona la distància on s'assoleix el 50% del L.F.L. i la distància del núvol visible (-)

$v_{\text{vent}}$ : velocitat del vent (m/s)

$HR(\%)$ : Humitat relativa (%)

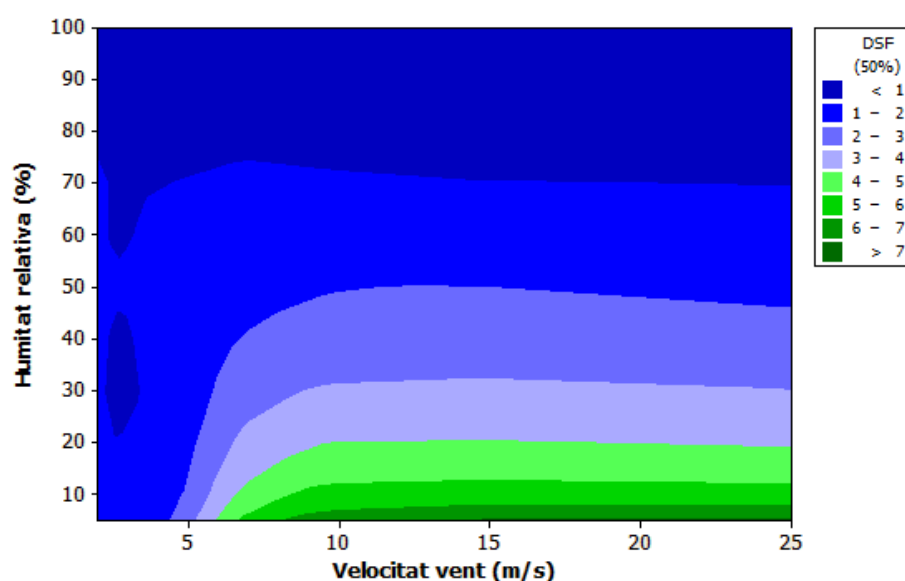
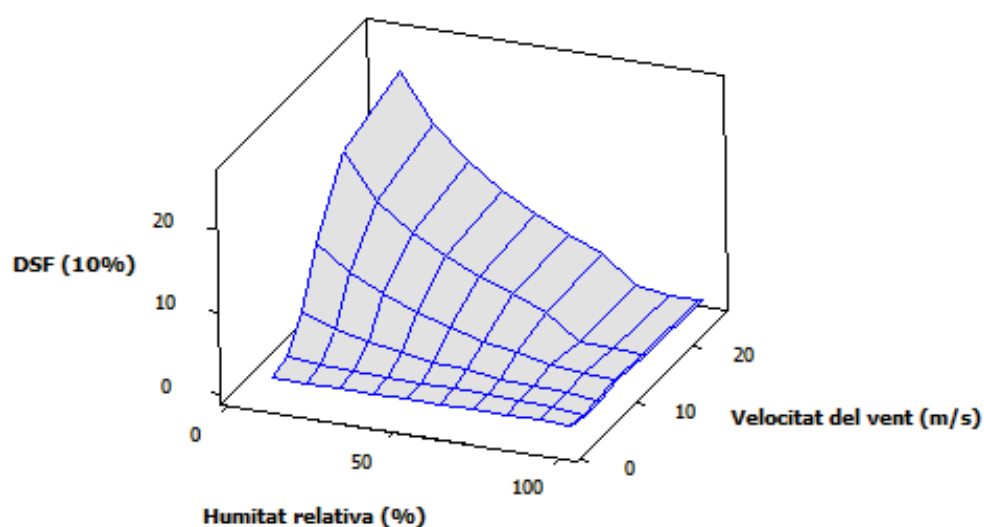


Figura 34. Gràfic de contorn del factor  $DSF_{50\%}$  en una fuga de GNL en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Independentment de la velocitat del vent, quan la humitat relativa és superior al 70%, el factor de seguretat és inferior a la unitat, per tant, la distància del 50% del L.F.L. queda a l'interior del núvol visible. A partir d'aquí, al disminuir la humitat relativa, el factor  $DSF_{50\%}$  va augmentant fins arribar a valors superiors a 7 quan la humitat és inferior al 5%.

Quan la concentració és el 10% del LFL es defineix la Zona d'alerta, per això es proposa el factor  $DSF_{10\%}$  que relacioni la distància on s'assoleix aquesta concentració amb la distància del núvol visible.



*Figura 35. Superfície de resposta del factor de seguretat  $DSF_{10\%}$  per fuites de GNL en funció de la humitat relativa i la humitat del vent*

De la mateixa manera que en els altres dos factors de seguretat estudiats, tal i com es pot observar a la Figura 35 quan la humitat relativa és baixa hi ha una diferència important del valor del factor de seguretat  $DSF$  en funció de la velocitat del vent. A mesura que augmenta la velocitat del vent, aquest factor augmenta assolint valors al voltant de 24 quan la humitat relativa és del 10% i la velocitat del vent de 25 m/s.



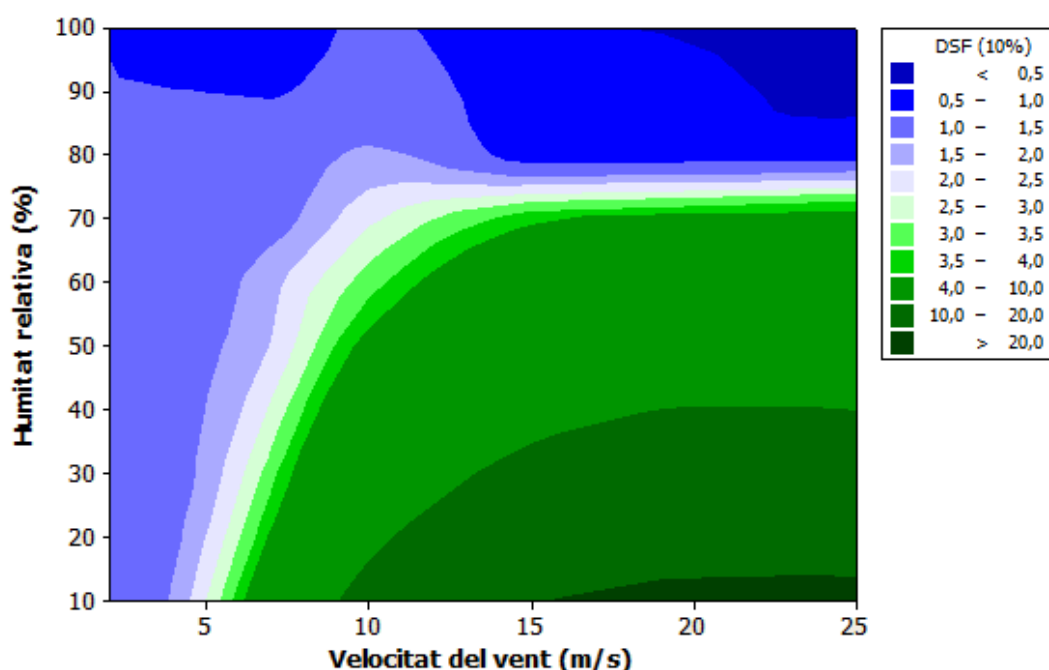


Figura 36. Gràfic de contorn del factor  $DSF_{10\%}$  en una fuga de GNL en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

El valor del factor  $DSF_{10\%}$ , tal com s'observa a la Figura 36 només assoleix valors inferiors a la unitat quan la humitat relativa és superior al 80% i la velocitat del vent és alta. Per tant, com menor sigui la humitat, més distància respecte del núvol visible s'haurà de prendre per estar en una zona segura, arribant fins a distàncies de més de 20 vegades la distància del núvol visible respecte del punt de fuga.

S'ha ajustat la superfície de resposta al següent polinomi per un rang d'humitat relativa entre el 10% i el 100%:

$$DSF_{10\%} = 0,55209 + 1,27515 \cdot v_{vent} - 0,10125 \cdot HR(\%) - 0,01183 \cdot v_{vent}^2 + 0,00103 \cdot HR(\%)^2 - 0,01082 \cdot v_{vent} \cdot HR(\%)$$

Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 2,00$  i un ajust del 84,80%.

On:

$DSF_{10\%}$ : Factor de Seguretat de la Dispersió, relaciona la distància on s'assoleix el 10% del L.F.L. i la distància del núvol visible (-)

$v_{vent}$ : velocitat del vent (m/s)

HR(%): Humitat relativa (%)

La velocitat del vent no només influeix en el factor de seguretat DSF, també afecta al perfil de temperatura i de concentració de la fuga. Tal i com es pot observar a la Figura 37 quan la velocitat del vent és baixa, el gas es pot dispersar més en la direcció perpendicular del vent i per tant la distància de seguretat necessària és més gran que per a les fugues en què la velocitat del vent és més alta (Figura 38). Tot i això, la major distància és la de la direcció del vent, per tant si es pren una distància de seguretat en base a aquesta, s'assegura una zona segura al voltant de la fuga.

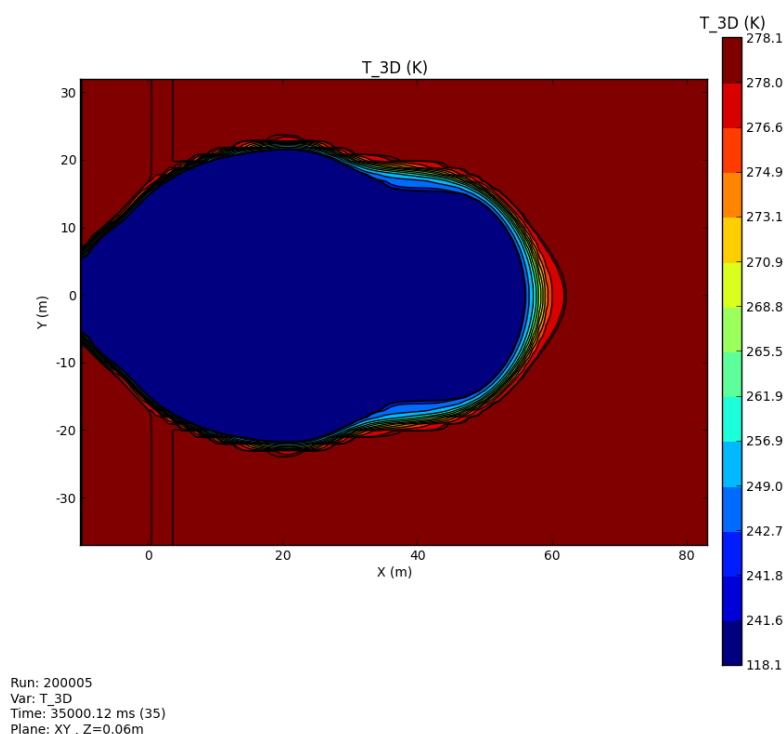
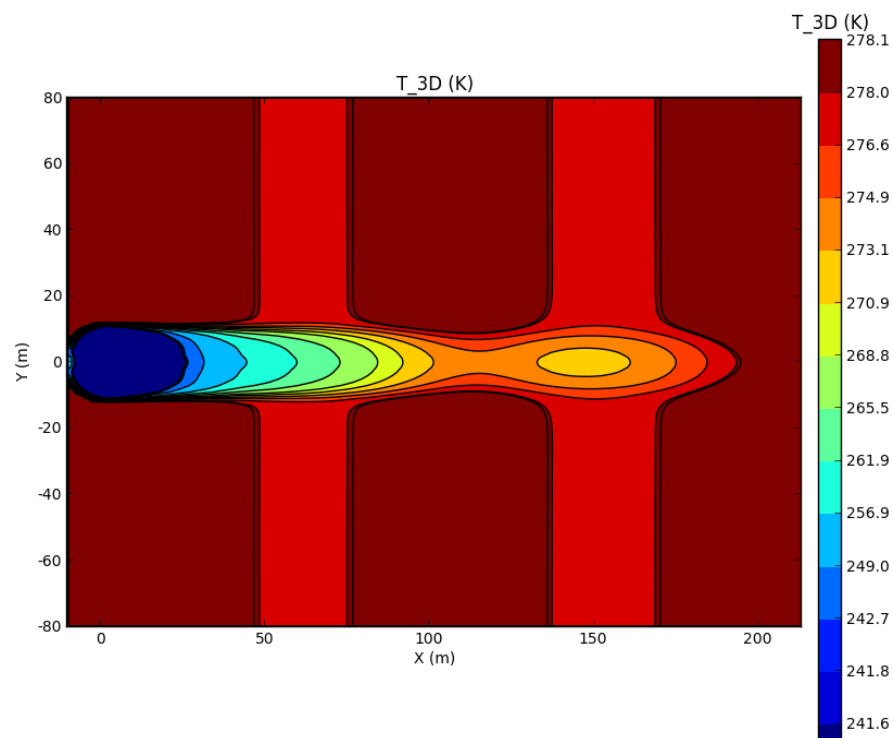


Figura 37. Perfil de temperatura fuga de 15 kg/s de GNL amb una velocitat del vent de 2 m/s i una temperatura de 5°C



*Figura 38. Perfil de temperatura fuga de 15 kg/s de GNL amb una velocitat del vent de 10 m/s i una temperatura de 5°C*

### 9.3. Factor de seguretat DSF pel propà

Anteriorment s'ha vist que tot i que les variables que tenen un efecte més important en el valor del coeficient de seguretat DSF són la humitat relativa i la velocitat del vent, en aquest cas, entre els diferents casos estudiats amb les mateixes condicions d'humitat i velocitat del vent però diferent cabal de fuga hi ha una desviació estàndard relativa molt elevada. En alguns casos, com quan la velocitat del vent és de 7 m/s arriba a valors del 70%. En els altres casos aquests valors són més baixos però les variacions augmenten principalment als extrems.

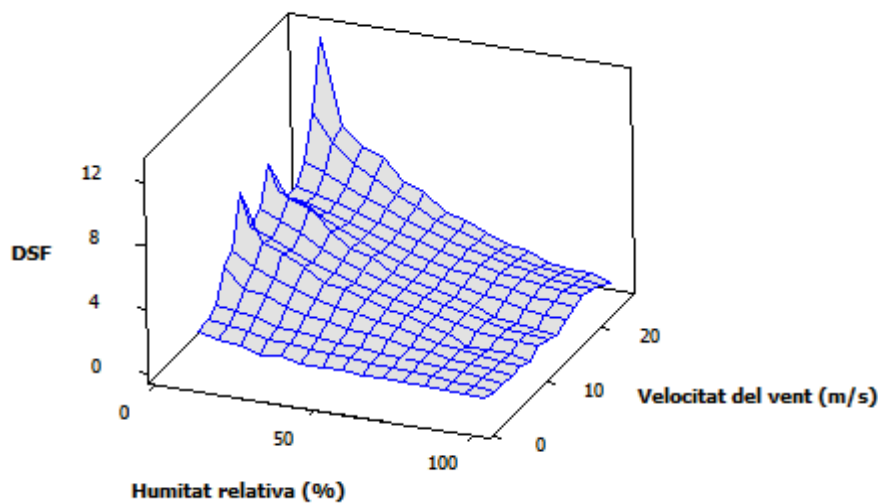


Figura 39. Superfície de resposta del factor de seguretat DSF per fuites de propà en funció de la humitat relativa i la humitat del vent quan el cabal de fuga és de 15 kg/s

En el cas del propà la tendència és semblant a la del GNL. Quan la humitat és alta, independentment de la velocitat els factors de seguretat DSF són baixos i a mesura que la humitat relativa disminueix, la velocitat del vent va agafant importància i com més gran és, superior és el factor DSF. En el cas d'una fuga de 15 kg/s s'arriba a uns factors pròxims a 12 quan la humitat relativa és del 5%.

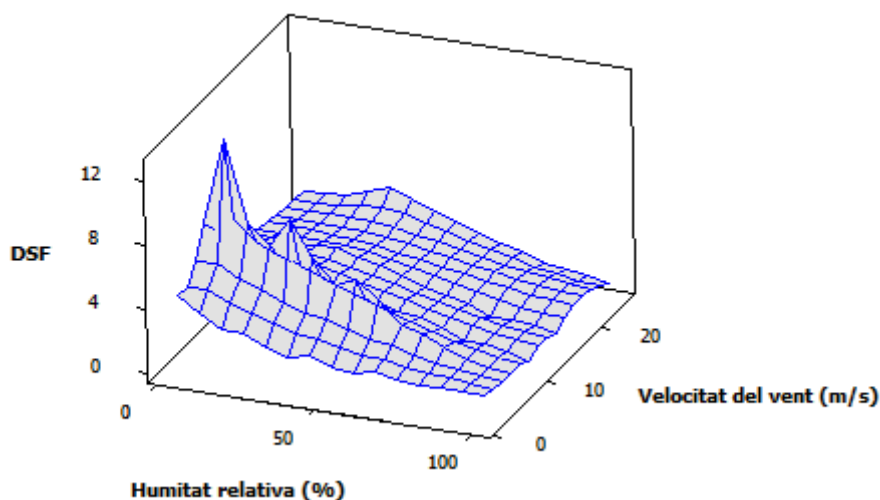


Figura 40. Superfície de resposta del factor de seguretat DSF per fuites de propà en funció de la humitat relativa i la humitat del vent quan el cabal de fuga és de 120 kg/s

En el cas de fuites de 120 kg/s, s'observa un comportament diferent tot. En aquest cas quan la humitat relativa és alta, el factor DSF continua essent baix però a mesura que disminueix

la humitat no s'observa un increment del factor DSF a mesura que augmenta la velocitat del vent. Això però, no seria del tot així ja que per velocitats del vent altes, quan la humitat relativa era molt baixa, en alguns casos no s'ha pogut determinar la distància visible ja que seria molt petita i fins i tot en alguns casos no seria possible observar el núvol visible. Per tant, en aquests casos el factor DSF tendria a infinit.

S'ha ajustat els valors de DSF al següent polinomi, aquest és vàlid per un rang d'humitats relatives entre el 20% i el 100% i una velocitat del vent entre 2 m/s i 15 m/s:

$$\begin{aligned} \text{DSF} = & 2,24310 + 0,00237 \cdot m + 0,60701 \cdot v_{\text{vent}} - 0,08650 \cdot \text{HR}(\%) - 5,3536 \cdot 10^{-4} \\ & \cdot v_{\text{vent}}^2 + 0,00077 \cdot \text{HR}(\%)^2 - 0,00681 \cdot v_{\text{vent}} \cdot \text{HR}(\%) - 6,3189 \cdot 10^{-4} \\ & \cdot m \cdot v_{\text{vent}} + 4,0805 \cdot 10^{-5} \cdot m \cdot \text{HR}(\%) \end{aligned}$$

Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 0,96$  i un ajust del 82,13%.

On:

DSF: Factor de Seguretat de la Dispersió (-)

m: cabal de fuga (kg/s)

$v_{\text{vent}}$ : velocitat del vent (m/s)

HR(%): Humitat relativa (%)

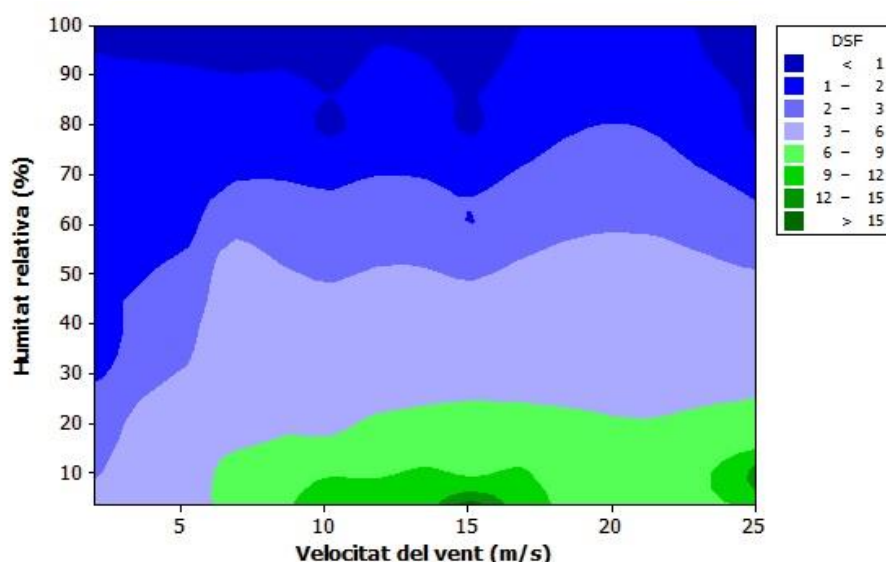
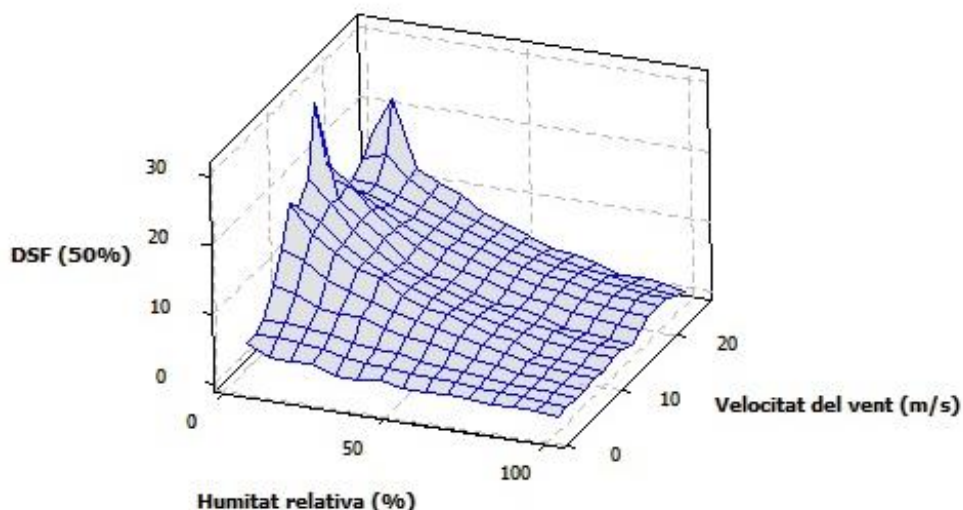


Figura 41. Gràfic de contorn del factor DSF en una fuga de propà en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Representant el factor DSF s'observa que en el cas del propà s'assoleixen valors del factor de seguretat DSF superiors, principalment perquè les distàncies visibles són bastant més baixes que en el cas del GNL. En aquest cas, a més, per tenir valors de DSF inferiors a la unitat són necessàries humitats superiors al 90%. Això suposa, que els cossos d'emergència hauran d'allunyar-se més del núvol visible.



*Figura 42. Superfície de resposta del factor de seguretat  $DSF_{50\%}$  per fuites de propà en funció de la humitat relativa i la humitat del vent*

Com pel GNL, en el cas del propà també s'ha estudiat un factor de seguretat que s'ha anomenat  $DSF_{50\%}$  i que relaciona la distància on s'assoleix el 50% del L.F.L. i la distància visible.

En aquest cas, el comportament és semblant i principalment el factor  $DSF_{50\%}$  augmenta quan la humitat relativa és baixa i la velocitat del vent alta (Figura 42).

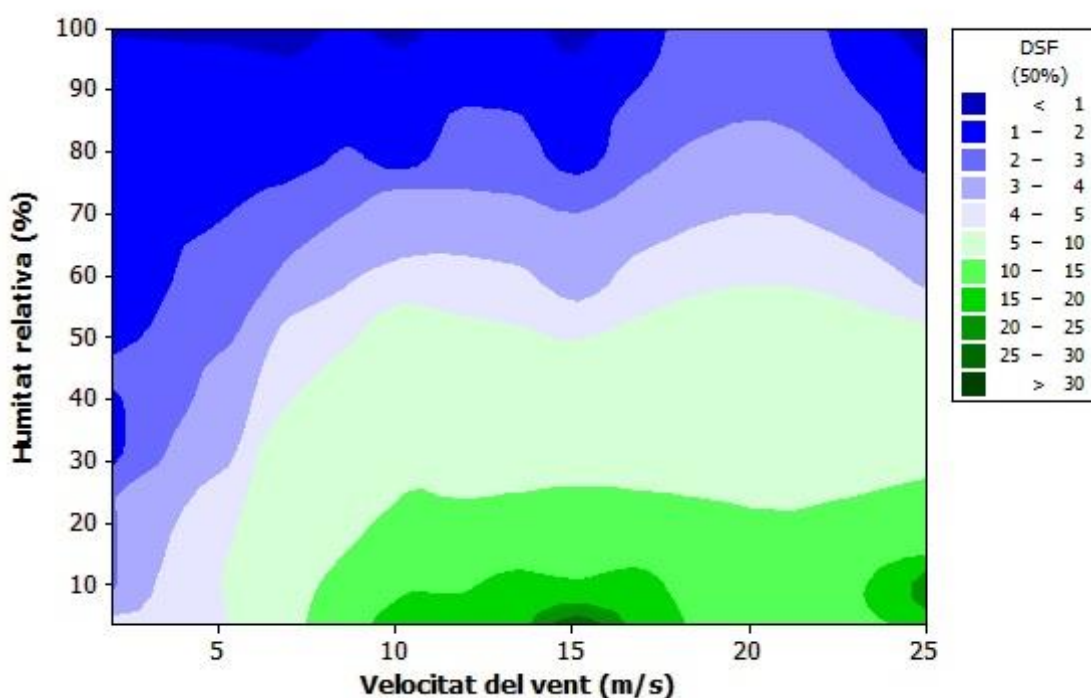


Figura 43. Gràfic de contorn del factor  $DSF_{50\%}$  en una fuga de propà en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Com es pot observar a la Figura 43, el factor  $DSF_{50\%}$  arriba a valors superiors a 30 quan la humitat és molt baixa, del 5%. Per humitats superiors al 70% s'obté valors inferiors a 3 i no és fins a humitats inferiors al 20% que el factor de seguretat supera un valor de 10.

Si es compara el propà amb el GNL s'observa clarament que els factors de seguretat pel propà són molt superiors.

S'ha ajustat els valors de  $DSF_{50\%}$ , en un rang d'humitats relatives del 20% al 100% i un rang de velocitat del vent entre 2 m/s i 15 m/s, al següent polinomi:

$$DSF_{50\%} = -0,28645 + 0,01125 \cdot m + 1,49690 \cdot v_{vent} - 0,09691 \cdot HR(\%) - 0,01181 \cdot v_{vent}^2 + 0,00116 \cdot HR(\%)^2 - 0,01479 \cdot v_{vent} \cdot HR(\%) - 3,6673 \cdot 10^{-4} \cdot m \cdot v_{vent} - 4,7886 \cdot 10^{-4} \cdot m \cdot HR(\%)$$

Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 2,13$  i un ajust del 76,26 %.

On:

$DSF_{50\%}$ : Factor de Seguretat de la Dispersió, relaciona la distància on s'assoleix el

50% del L.F.L. i la distància del núvol visible (-)

m: cabal de fuga (kg/s)

$v_{vent}$ : velocitat del vent (m/s)

HR(%): Humitat relativa (%)

En el cas del propà l'ajust no és tant bo ja que en alguns casos, quan la humitat relativa era molt baixa, no ha estat possible obtenir dades de la distància visible i per tant del factor DSF o  $DSF_{50\%}$ .

Pel propà també s'ha determinat el factor de seguretat  $DSF_{10\%}$  que determina la relació entre la distància a on s'assoleix una concentració equivalent al 10% del LFL i la distància del núvol visible.

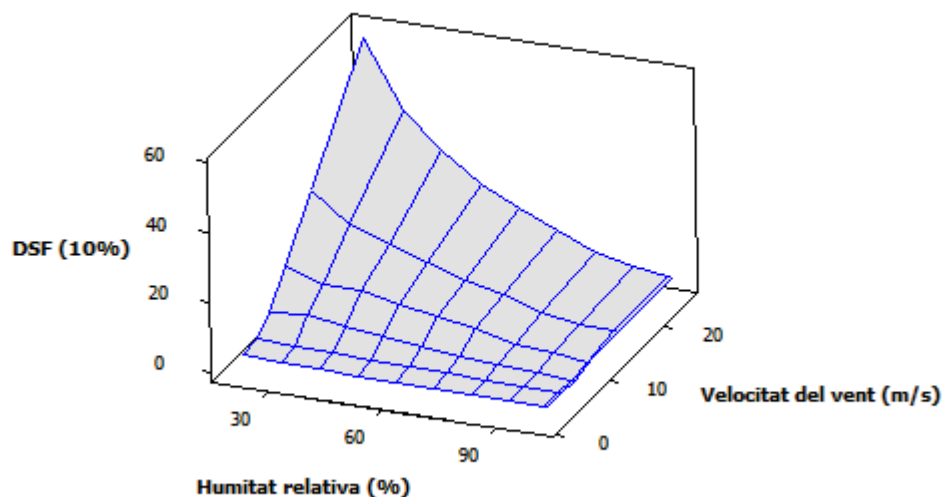


Figura 44. Superfície de resposta del factor de seguretat  $DSF_{10\%}$  per fugites de propà en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Com s'observa a la Figura 44 el factor  $DSF_{10\%}$  també té tendència a augmentar a mesura que la humitat relativa disminueix i la velocitat del vent augmenta.

S'ha ajustat els valors de  $DSF_{10\%}$  en un rang d'humitats relatives del 20% al 100% al següent polinomi:

$$DSF_{10\%} = -0,28140 + 2,30663 \cdot v_{vent} - 0,13812 \cdot HR(\%) - 0,00214 \cdot v_{vent}^2 + 0,00165 \cdot HR(\%)^2 - 0,02375 \cdot v_{vent} \cdot HR(\%)$$



Obtenint una desviació estàndard de  $\pm 3,14$  i un ajust del 86,7%.

On:

$DSF_{10\%}$ : Factor de Seguretat de la Dispersió, relaciona la distància on s'assoleix el 10% del L.F.L. i la distància del núvol visible (-)

$m$ : cabal de fuga (kg/s)

$v_{vent}$ : velocitat del vent (m/s)

$HR(\%)$ : Humitat relativa (%)

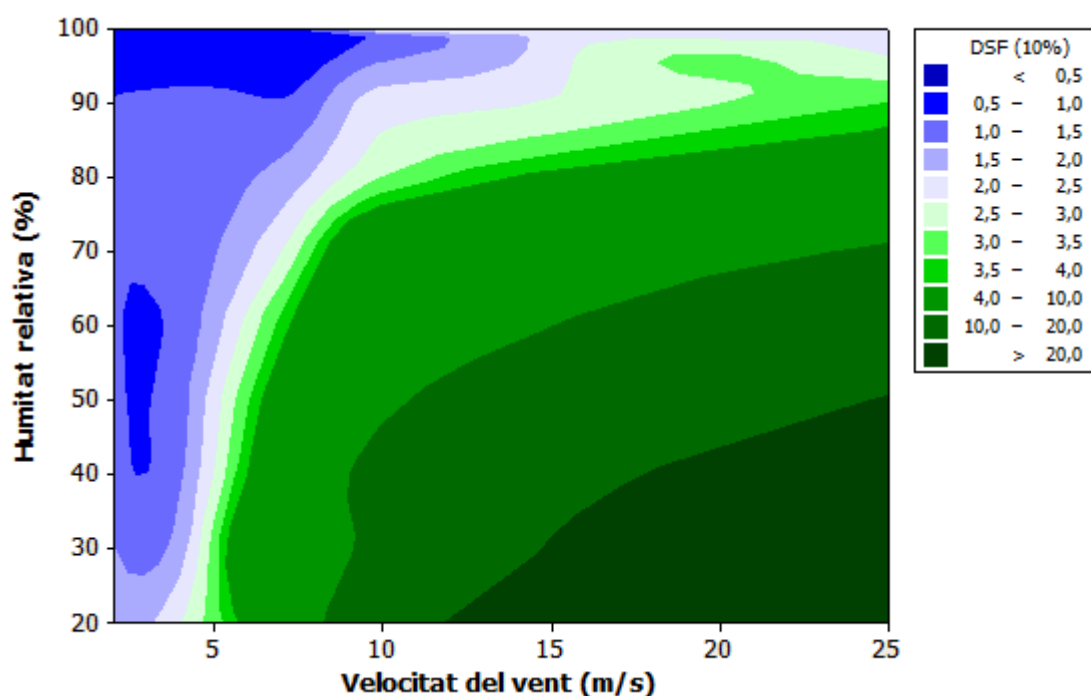


Figura 45. Gràfic de contorn del factor  $DSF_{10\%}$  en una fuga de propà en funció de la humitat relativa i la velocitat del vent

Pel cas de  $DSF_{10\%}$ , són molt poques les zones on el factor de seguretat és inferior a la unitat, tal com s'observa a la Figura 45, només succeeix quan la humitat relativa és superior al 90% i la velocitat del vent inferior als 10 m/s. Per humitats més baixes i velocitat del vent alta, s'assoleix valors del factor de seguretat bastant elevats, podent superar una relació de 20 vegades la distància del núvol visible.



## 10. Conclusions

La validació del programa FLACS utilitzant dades d'experiments realitzats a gran escala per estudiar la dispersió, ha permès determinar que els resultats obtinguts de les simulacions on el líquid vessat forma un bassal i es va evaporant s'ajusten millor als resultats mesurats als experiments reals. Tot i així, s'obtenen errors de fins al 30%. En canvi, les fuites on el gas s'allibera a raig mostren un percentatge d'error superior, sobretot per determinar les distàncies del núvol visible.

En el cas de les fuites de GNL s'ha pogut proposar un coeficient de seguretat en base a la velocitat del vent i la humitat relativa, ja que aquestes són les dues variables que afecten principalment al seu valor.

En el cas del GNL quan la humitat relativa és alta, superior al 60%, independentment del valor de la velocitat del vent s'obtenen valors de DSF inferiors a 1, fet que permet treballar amb més seguretat als cossos d'emergències ja que la distància fins a on hi ha una concentració de gas superior al límit inferior d'inflamabilitat es troba dins del núvol visible causat per la condensació de l'aigua. Si es compara aquestes dades amb les obtingudes per Vílchez et al. (2013), s'observa que als càlculs realitzats amb DEGADIS es va obtenir que el factor DSF pren un valor inferior a 1 quan la humitat relativa és superior al 51% quan la velocitat del vent és inferior a 2 m/s i quan en general quan la humitat és superior al 53. Tot i així, l'estudi realitzat per Vílchez no inclou la variabilitat que provoca el vent en el valor del factor DSF. És cert que quan les velocitats són baixes el factor de seguretat depèn principalment de la humitat relativa, però si la velocitat del vent augmenta és necessari considerar-la per poder calcular correctament el factor DSF.

En canvi quan la humitat és inferior, a mesura que augmenta la velocitat del vent, també ho fa el factor DSF, fins a valors superiors a 4, implicant que la distància on hi ha risc d'incendi o explosió arriba fins a 4 vegades la distància del núvol visible.

No només la distància en la direcció del vent depèn de la velocitat del vent, també ho fa la dispersió en la direcció perpendicular a aquest. Velocitats del vent baixes permeten una dispersió horitzontal més gran, donant lloc a una forma del núvol més arrodonida, en canvi, a velocitats altes la dispersió té una forma més allargada i estreta.

En el cas del propà les variables que influeixen més en el càlcul del factor de seguretat DSF també són la humitat relativa i la velocitat del vent. En aquest cas, però, ha estat necessari considerar també el cabal de fuga per poder obtenir un bon ajust.

De la mateixa manera que ha passat amb el GNL, quan la humitat és alta s'obtenen factors

DSF inferiors i a mesura que aquesta disminueix i la velocitat del vent augmenta, s'arriba a factors DSF superiors, en aquest cas fins i tot superiors a 15. En aquest cas per tenir un factor DSF inferior a la unitat és necessària una humitat relativa superior al 90% quan la velocitat del vent és baixa i quan és superior als 15 m/s, fins i tot és possible que no es vegi el núvol visible si la humitat relativa no és molt pròxima al 100%. Si es compara amb les dades de Vílchez et al. (2014)

Aquesta diferència dels valors màxims del factor DSF obtingut amb propà en comparació amb el del GNL es deu principalment a que les distàncies del núvol visible en el cas del propà a humitat baixes són menors, provocant un augment del factor de seguretat DSF. Això implica que els cossos de seguretat hagin de treballar amb distàncies respecte del núvol visible molt superiors.

## 11. Agraïments

Voldria agrair a les Dra. Elsa Pastor i la Dra. Eulàlia Planas per permetre'm realitzar aquest treball al centre de recerca CERTEC i per la seva ajuda i guia durant la realització d'aquest treball.

També voldria agrair a l'Adriana Miralles la seva ajuda i bona predisposició en tot moment i als companys del CERTEC.



## 12. Bibliografia

### 12.1.Referències bibliogràfiques

- [1] D. A. Wood, «A review and outlook for the global LNG trade», *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 9, p. 16-27, 2012.
- [2] C. H. Lai, C. C. Chang, C. H. Wang, M. Shao, Y. Zhang, i J. L. Wang, «Emissions of liquefied petroleum gas (LPG) from motor vehicles», *Atmos. Environ.*, vol. 43, núm. 7, p. 1456-1463, 2009.
- [3] L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršiene, i M. Starevičius, «Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, p. 513-525, 2014.
- [4] Sam Mannan, *Lees' Loss Prevention in the process industries*, Tercera ed., vol. 1. Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2005.
- [5] D. Z. Zhu, «Example of simulating analysis on LNG leakage and dispersion», *Procedia Eng.*, vol. 71, p. 220-229, 2014.
- [6] «Consejo de Seguridad 14 – Manipulación del gas licuado del petróleo». Abelló Linde, 2016.
- [7] U. Lng, R. Phase, G. A. Melhem, S. Saraf, i H. Ozog, «LNG Properties and Hazards: Understand LNG Rapid Phase Transitions», *Risk Anal.*, p. 38, 2006.
- [8] E. T. Sierra, «NTP 430 : Gases licuados : evaporación de fugas y derrames», Madrid, 1994.
- [9] J. A. Vílchez, S. Sevilla, H. Montiel, i J. Casal, «Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 8, núm. 2, p. 87-96, 1995.
- [10] C.-I. International, *Safety History of International LNG Operations*, Primera ed. Houston: The LNG Specialists, 2009.
- [11] E. Eleftheria, P. Apostolos, i V. Markos, «Statistical analysis of ship accidents and review of safety level», *Saf. Sci.*, vol. 85, p. 282-292, 2016.
- [12] N. Paltrinieri, A. Tugnoli, i V. Cozzani, «Hazard identification for innovative LNG regasification technologies», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 137, p. 18-28, 2015.
- [13] R. Bubbico, C. Ferrari, i B. Mazzarotta, «Risk analysis of LPG transport by road and rail», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 13, núm. 1, p. 27-31, 2000.
- [14] Generalitat De Catalunya, «Pla d'emergència exterior del sector químic de Catalunya (PLASEQCAT)», 2015.

- [15] British Standards, *Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installations (BS EN1473:2007)*. British Standard Institute, 2007.
- [16] J. Casal Fàbrega, *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*, Primera ed. Barcelona: Edicions UPC, 1999.
- [17] D. Villafañe, «Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP)», Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [18] A. Luketa-Hanlin, «A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling», *J. Hazard. Mater.*, vol. 132, núm. 2-3, p. 119-140, 2006.
- [19] J. Goldwire, HC i H. Rodean, «Coyote series data report LLNL/NWC 1981 LNG spill tests. Dispersion, vapor burn and rapid-phase-transition», Livermore, California, 1983.
- [20] W. Emerson i T. Felleisen, *LIQUEFIED NATURAL GAS: An Overview of the LNG Industry for Fire Marshals and Emergency Responders*, Primera ed. Washington DC: Hildebrand and Noll Associates, Inc., 2005.
- [21] S. Gant i J. Hoyes, «Review of FLACS version 9.0: Dispersion modelling capabilities», *Rev. Lit. Arts Am.*, 2010.
- [22] J. Casal, *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*, Primera ed. Barcelona: Elsevier, 2007.
- [23] W. F. J. M. Engelhard, *Methods for the Calculation of Physical Effects*, Tercera ed. La Haia: Gevaarlijke Stoffen, 1997.
- [24] J. A. Vilchez, D. Villafañe, i J. Casal, «A dispersion safety factor for LNG vapor clouds», *J. Hazard. Mater.*, vol. 246-247, p. 181-188, 2013.
- [25] A. M. Schleder, «Quantitative dispersion analysis of leakages of flammable and / or toxic substances on environments with barriers or semi-confined substances on environments with barriers or semi-confined», Polytechnic School of University of Sao Paulo; Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [26] S. R. Hanna, J. C. Chang, i D. G. Strimaitis, «Hazardous gas model evaluation with field observations», *Atmos. Environ.*, vol. 27A, núm. 15, p. 2265-2285, 1993.
- [27] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Segona ed. New York.
- [28] T. Scpicer i J. Havens, «User's Guide For The DEGADIS 2.1». Office of Air Quality Planning and Standradrds Office of Air and Radiation, Springfield, VA, p. 419, 1989.
- [29] C. Zhao, J. Han, X. Yang, J. Qian, i B. Fan, «A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process», *Appl. Energy*, vol. 168, p. 314-331, 2016.
- [30] S. Dharmavaram, S. R. Hanna, i O. R. Hansen, «Consequence analysis—Using a CFD model for industrial sites», *Process Saf. Prog.*, vol. 24, núm. 4, p. 316-272, 2005.
- [31] T. Terje Egeberg, M. M. Davidsen, i S. N. Venkatraman, «Comparative study on gas



- dispersion», Kjeller, Noruega, 2012.
- [32] Gexcon AS, «FLACS v10.4 User's Manual». GexCon, Noruega, p. 491, 2015.
- [33] J. C. Chang i S. R. Hanna, «Air quality model performance evaluation», *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 87, núm. 1-3, p. 167-196, 2004.
- [34] S. R. Hanna, O. R. Hansen, i S. Dharmavaram, «FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations», *Atmos. Environ.*, vol. 38, núm. 28, p. 4675-4687, 2004.
- [35] O. R. Hansen, F. Gavelli, M. Ichard, i S. G. Davis, «Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, núm. 6, p. 857-877, 2010.
- [36] P. Middha, O. R. Hansen, i I. E. Storvik, «Validation of CFD-model for hydrogen dispersion», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, núm. 6, p. 1034-1038, 2009.
- [37] P. Middha, O. R. Hansen, J. Grune, i A. Kotchourko, «CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments», *J. Hazard. Mater.*, vol. 179, núm. 1-3, p. 84-94, 2010.
- [38] S. R. Hanna, J. C. Chang, i D. G. Strimaitis, «Hazardous gas model evaluation with field observation», *Atmos. Environ.*, vol. 27, núm. 15, p. 2265-2285, 1993.
- [39] S. Hartwig, Ed., *Heavy Gas and Risk Assessment - II. Proceedings of the Second Symposium on Heavy Gases and Risk Assessment, Frankfurt am Main, May 25-26, 1982*. Frankfurt: D. Reidel Publishing Company, 1982.
- [40] J. S. Puttock i D. R. Blackmore, «Field experiments of dense gas dispersion», *J. Hazard. Mater.*, vol. 6, p. 13-41, 1982.
- [41] M. Lane, L. E. C. R. Tjn, D. R. Blackmore, J. A. Eyre, G. G. Summers, D. R. B. Ma, i J. A. Eyre, «Dispersion and combustion behaviour of gas clouds resulting from large spillages of LNG on the sea», *Trans I Mar E*, vol. 94, núm. 29, 1982.
- [42] R. Koopman, J. Baker, R. Cederwall, J. Goldwire, HC, W. Hogan, L. Kamppinen, R. Kiefer, J. McClure, T. McRae, D. Morgan, L. Morris, J. Spann, MW, i C. Lind, «Burro series data report LLNL/NWC 1980 LNG spill tests», 1982.
- [43] C. J. Butler i Royle M., «Experimental data acquisition for validation of a new vapour cloud fire ( VCF ) modelling approach», Harpur Hill, Buxton, 2001.
- [44] A. M. Schleder, E. Pastor, E. Planas, i M. R. Martins, «Journal of Loss Prevention in the Process Industries Experimental data and CFD performance for cloud dispersion analysis: The USP-UPC project», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 38, p. 125-138, 2015.
- [45] N. C. Daish, P. F. Linden, V. Vieillard, D. Nedelka, T. A. Roberts, i C. J. Butler, «a New Unified Investigation Into Vapour Cloud Fires Une Nouvelle Collaboration Internationale Pour L ' Etude De Feux De Nuages De Vapeurs De Gnl Et Gpl».

- [46] R. P. Koopman, R. T. Cederwall, D. L. Ermak, H. C. Goldwire, W. J. Hogan, J. W. McClure, T. G. Mcrae, D. L. Morgan, H. C. Rodean, i J. H. Shinn, «Analysis of Burro series 40 m3 LNG spill experiments», *J. Hazard. Mater.*, vol. 6, p. 43-83, 1982.
- [47] D. L. Ermak, S. T. Chan, D. L. Morgan, i L. K. Morris, «A comparison of dense gas dispersion model simulations with Burro Series LNG spill test results», *J. Hazard. Mater.*, vol. 6, p. 129-160, 1982.



## Annexes

### Annex A: Condicions simulades

En aquest annex s'adjunta el codi d'entrada al programa FLACS necessari per portar a terme les simulacions. Es presenta un exemple de simulacions tipus dard i un tipus basal.

#### HSL. Trial 8 (Tipus dard)

```
VERSION 0.5
%TEMPLATE="_v9.1/scenario/default+1"
%!TEMPLATE_NAME="Dispersion and ventilation"
%!SIMULATOR="flacs"
%!TITLE=""
%!DESCRIPTION=""
%!WRITE_ALL_VARIABLES="false"
%!VERSION="v10.x"
```

#### SINGLE\_FIELD\_VARIABLES

```
NFUEL  "FUEL"  " 1      "(-)  " N
      "Fuel mass fraction"
NFMOLE  "FMOLE"  " 1      "(m3/m3) " N
      "Fuel mole fraction"
NT      "T"      " 1      "(K)   " N
      "Temperature"
```

#### EXIT SINGLE\_FIELD\_VARIABLES

#### MONITOR\_POINTS

```
INSERT 1 10 0 1.5
INSERT 2 15 3 0.2
INSERT 3 15 1.5 0.2
INSERT 4 15 0 1.5
INSERT 5 15 -1.5 0.2
INSERT 6 15 -3 0.2
INSERT 7 20 4 0.2
INSERT 8 20 2 0.2
INSERT 9 20 0 1.5
INSERT 10 20 -2 0.2
```

INSERT 11	20	-4	0.2
INSERT 12	10	0	0.85
INSERT 13	30	3	0.2
INSERT 14	30	0	1.5
INSERT 15	30	-3	0.2
INSERT 16	10	0	0.2
INSERT 17	40	0	1.5
INSERT 18	50	0	0.2
INSERT 19	15	0	0.85
INSERT 20	15	0	0.2
INSERT 21	60	0	0.2
INSERT 22	20	0	0.85
INSERT 23	20	0	0.2
INSERT 24	70	0	0.2
INSERT 25	80	0	0.2
INSERT 26	30	0	0.85
INSERT 27	30	0	0.2
INSERT 28	100	0	0.2
INSERT 29	40	0	0.85
INSERT 30	40	0	0.2
INSERT 31	10	0	1.5
INSERT 32	15	0	1.5
INSERT 33	20	0	1.5
INSERT 34	30	0	1.5
INSERT 35	40	0	1.5
INSERT 36	50	0	1.5
INSERT 37	60	0	1.5
INSERT 38	70	0	1.5
INSERT 39	80	0	1.5
INSERT 40	100	0	1.5
INSERT 41	1	0	1.5
INSERT 42	2	0	1.5
INSERT 43	3	0	1.5
INSERT 44	4	0	1.5
INSERT 45	5	0	1.5
INSERT 46	6	0	1.5
INSERT 47	7	0	1.5
INSERT 48	8	0	1.5
INSERT 49	9	0	1.5
INSERT 50	10	0	1.5

EXIT MONITOR\_POINTS

PRESSURE\_RELIEF\_PANELS

EXIT PRESSURE\_RELIEF\_PANELS

SINGLE\_FIELD\_SCALAR\_TIME\_OUTPUT

NFUEL 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40

41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

NFMOLE 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40

41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

NT 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40

41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

EXIT SINGLE\_FIELD\_SCALAR\_TIME\_OUTPUT

SINGLE\_FIELD\_3D\_OUTPUT

NFMOLE

NT

EXIT SINGLE\_FIELD\_3D\_OUTPUT

SIMULATION\_AND\_OUTPUT\_CONTROL

TSTART -1

TMIN -1

TMAX 180

LAST -1

LOAD -1

CFLC 10

CFLV 1

STEP ""

KEYS ""

SCALE 1

MODD 1

NPLOT 0

DTPLOT 1

GRID "CARTESIAN"

INCOMPRESSIBLE 0

WALLF 1

HEAT\_SWITCH 0

EXIT SIMULATION\_AND\_OUTPUT\_CONTROL

## BOUNDARY\_CONDITIONS

XLO	"WIND"			
WIND_SPEED	3			
WIND_DIRECTION	0.34202	0.93969	0	
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0.1			
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0			
WIND_BUILDUP_TIME	5			
XHI	"NOZZLE"			
YLO	"WIND"			
WIND_SPEED	3			
WIND_DIRECTION	0.34202	0.93969	0	
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0.1			
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0			
WIND_BUILDUP_TIME	5			
YHI	"NOZZLE"			
ZLO	"NOZZLE"			
ZHI	"WIND"			
WIND_SPEED	3			
WIND_DIRECTION	0.34202	0.93969	0	
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0.1			
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0			
WIND_BUILDUP_TIME	5			

## EXIT\_BOUNDARY\_CONDITIONS

## INITIAL\_CONDITIONS

UP-DIRECTION	0	0	1
GRAVITY_CONSTANT	9.8		
CHARACTERISTIC_VELOCITY	3		
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0.1		
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0		
TEMPERATURE	14.5		
AMBIENT_PRESSURE	100000		
AIR	"NORMAL"		
GROUND_HEIGHT	0		
GROUND_ROUGHNESS	0.03		
REFERENCE_HEIGHT	10		
CANOPY_HEIGHT	0		
LATITUDE	0		
SURFACE_HEAT_P1	0	0	0
SURFACE_HEAT_P2	0	0	0

MEAN\_SURFACE\_HEAT\_FLUX 0  
 PASQUILL\_CLASS "D"  
 GROUND\_ROUGHNESS\_CONDITION "URBAN"  
 EXIT\_INITIAL\_CONDITIONS

#### GAS\_COMPOSITION\_AND\_VOLUME

POSITION\_OF\_FUEL\_REGION 0 0 0  
 DIMENSION\_OF\_FUEL\_REGION 0 0 0  
 TOXIC\_SPECIFICATION ""

#### VOLUME\_FRACTIONS

METHANE 0  
 ACETYLENE 0  
 ETHYLENE 0  
 ETHANE 0  
 PROPYLENE 0  
 PROPANE 100  
 BUTANE 0  
 PENTANE 0  
 HEXANE 0  
 HEPTANE 0  
 OCTANE 0  
 NONANE 0  
 DECANE 0  
 HENDECANE 0  
 DODECANE 0  
 HYDROGEN 0  
 CO 0  
 H2S 0  
 H2O 0  
 CO2 0  
 USERSPEC\_1 0  
 USERSPEC\_2 0  
 USERSPEC\_3 0  
 TOXIC 0

#### EXIT\_VOLUME\_FRACTIONS

EQUIVALENCE\_RATIOS\_(ER0\_ER9) 1e+30 0

#### EXIT\_GAS\_COMPOSITION\_AND\_VOLUME

#### LEAKS

#### INSERT 1

%#!! Added by leak wizard, do not edit



```

%#!! Jet program input:
%#!! JET_GAS_TYPE=PROPANE=100
%#!! JET_RESERVOIR_VOLUME=1
%#!! JET_RESERVOIR_PRESSURE=5.4
%#!! JET_RESERVOIR_TEMPERATURE=11.96
%#!! JET_ATMOSPHERIC_TEMPERATURE=14.5
%#!! JET_NOZZLE_DIAMETER=0.05
%#!! JET_DISCHARGE_COEFFICIENT=0.86
%#!! JET_START_TIME=10
%#!! JET_TIME_STEP=1
%#!! JET_ITERATIONS=100
%#!! JET_SHUTOFF_PRESSURE=0
%#!! JET_RELEASE_MASS=327
%#!! JET_HEAT_TRANSFER_COEFFICIENTS=[0, 0]
%#!! JET_ATMOSPHERIC_PRESSURE=1
%#!! JET_WALL_TEMPERATURE=12
%#!! JET_RTI=0.1
%#!! JET_TLS=0.1 *D
%## Jet program output:
%##
%## GENERAL:
%##          gas type = PROPANE=100
%##          mole weight = 44.097 kg/kmol
%##          heat ratio, kappa = Cp/Cv = 1.150 -
%##          critical pressure ratio = 0.574 -
%##
%## RESERVOIR:
%##          critical pressure = 0.741 barg
%##          pressure = 5.400 barg
%##          temperature = 11.960 C
%##          density = 11.905 kg/m3
%##          volume = 1.000 m3
%##          initial mass = 11.905 kg
%##
%## MACH:
%##          speed of sound, M=0 = 248.638 m/s
%##          speed of sound, M=1 = 239.807 m/s
%##          pressure, M=1 = 2.676 barg
%##          temperature, M=1 = -7.931 C
%##          density, M=1 = 7.351 kg/m3

```

### maximum velocity = 907.896 m/s

###

### NOZZLE:

### effective diameter = 46.368 mm

### effective area = 1688.606 mm<sup>2</sup>

### discharge coefficient = 0.860 -

### sonic massflow = 2.977 kg/s

### jet force = 1165.731 N

###

### ATMOSPHERIC:

### pressure = 1.000 bara

### temperature = 14.500 C

### density = 1.844 kg/m<sup>3</sup>

##

TYPE	"JET"		
POSITION	0	0	1.5
SIZE	0	0	0
OPEN_SIDES	"+X"		
START_TIME	5		
DURATION	131		

OUTLET

AREA	0.002835
MASS_FLOW	2.5
VELOCITY	50
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0.1
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0.0019
TEMPERATURE	-5.799999999999995
DIRECTION_COSINES	0 0 0

EXIT OUTLET

VESSEL

PRESSURE	0
TEMPERATURE	0
VOLUME	0
HEAT_EXCHANGE_COEFFICIENT	0
WALL_TEMPERATURE	0

EXIT VESSEL

EXIT LEAKS

IGNITION



```

POSITION_OF_IGNITION_REGION 30      0      0
DIMENSION_OF_IGNITION_REGION 0.1    0.1    2
TIME_OF_IGNITION            110
RADMAX                      0
EXIT IGNITION

```

```

WATERSPRAY
EXIT WATERSPRAY

```

```

LOUVRE_PANELS
EXIT LOUVRE_PANELS

```

```

GRATING
EXIT GRATING

```

```

GAS_MONITOR_REGION
  POSITION      -10    -15    0
  SIZE         110    30     9
EXIT GAS_MONITOR_REGION

```

```

SPECIES
EXIT SPECIES

```

```

EXIT

```

### **Burro 3 (Bassal)**

```

VERSION 0.5
%TEMPLATE="_v9.1/scenario/pool"
%!TEMPLATE_NAME="Pool"
%!SIMULATOR="pool"
%!TITLE=""
%!DESCRIPTION=""
%!WRITE_ALL_VARIABLES="false"
%!VERSION="v10.x"

```

```

SINGLE_FIELD_VARIABLES
NERNFL  "ERNFL"  " 1"    "(-)"  " N
"Equivalence ratio, normalized flammable range"
NEQLFL  "EQLFL"  " 1"    "(-)"  " N
"Equivalence ratio, %LFL"

```

```

NT      "T      " 1      "(K)      " N
"Temperature"
POOL_D  "POOL_D  " 1      "(m)      " N
"Pool depth"
NFUEL   "FUEL    " 1      "(-)      " N
"Fuel mass fraction"
NFMOLE  "FMOLE   " 1      "(m3/m3) " N
"Fuel mole fraction"
NERLFL  "ERLFL   " 1      "(-)      " N
"Equivalence ratio, %LFL"

```

EXIT SINGLE\_FIELD\_VARIABLES

MONITOR\_POINTS

```

INSERT 1 0    57    1
INSERT 2 0    140   1
INSERT 3 0    400   1
INSERT 4 0    800   1
INSERT 5 0    57    3
INSERT 6 0    140   3
INSERT 7 0    140   8
INSERT 8 0    400   3
INSERT 9 0    400   8
INSERT 10 0   800   3
INSERT 11 0   800   8
INSERT 12 0   57    8

```

EXIT MONITOR\_POINTS

PRESSURE\_RELIEF\_PANELS

EXIT PRESSURE\_RELIEF\_PANELS

SINGLE\_FIELD\_SCALAR\_TIME\_OUTPUT

NT 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

NFMOLE 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

EXIT SINGLE\_FIELD\_SCALAR\_TIME\_OUTPUT

SINGLE\_FIELD\_3D\_OUTPUT

NERNFL

NEQLFL

NT

POOL\_D

NFUEL

NFMOLE

NERLFL

EXIT SINGLE\_FIELD\_3D\_OUTPUT

#### SIMULATION\_AND\_OUTPUT\_CONTROL

TSTART	-1
TMIN	-1
TMAX	300
LAST	-1
LOAD	-1
CFLC	20
CFLV	1
STEP	""
KEYS	""
SCALE	1
MODD	1
NPLOT	-1
DTPLOT	5
GRID	"CARTESIAN"
INCOMPRESSIBLE	0
WALLF	1
HEAT_SWITCH	0

EXIT SIMULATION\_AND\_OUTPUT\_CONTROL

#### BOUNDARY\_CONDITIONS

XLO	"WIND"		
WIND_SPEED	5.4		
WIND_DIRECTION	0	1	0
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0		
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0		
WIND_BUILDUP_TIME	0		
XHI	"WIND"		
WIND_SPEED	5.4		
WIND_DIRECTION	0	1	0
RELATIVE_TURBULENCE_INTENSITY	0		
TURBULENCE_LENGTH_SCALE	0		
WIND_BUILDUP_TIME	0		
YLO	"WIND"		
WIND_SPEED	5.4		

WIND\_DIRECTION           0       1       0

RELATIVE\_TURBULENCE\_INTENSITY 0

TURBULENCE\_LENGTH\_SCALE   0

WIND\_BUILDUP\_TIME       0

YHI                   "NOZZLE"

ZLO                   "EULER"

ZHI                   "WIND"

WIND\_SPEED           5.4

WIND\_DIRECTION           0       1       0

RELATIVE\_TURBULENCE\_INTENSITY 0

TURBULENCE\_LENGTH\_SCALE   0

WIND\_BUILDUP\_TIME       0

EXIT BOUNDARY\_CONDITIONS

INITIAL\_CONDITIONS

UP-DIRECTION           0       0       1

GRAVITY\_CONSTANT       9.8

CHARACTERISTIC\_VELOCITY   5.4

RELATIVE\_TURBULENCE\_INTENSITY 0

TURBULENCE\_LENGTH\_SCALE   0

TEMPERATURE           33.8

AMBIENT\_PRESSURE       94800

AIR                   "NORMAL"

GROUND\_HEIGHT       0

GROUND\_ROUGHNESS       0.001

REFERENCE\_HEIGHT       2

CANOPY\_HEIGHT       0

LATITUDE           0

SURFACE\_HEAT\_P1       0       0       0

SURFACE\_HEAT\_P2       0       0       0

MEAN\_SURFACE\_HEAT\_FLUX   0

PASQUILL\_CLASS       "D"

GROUND\_ROUGHNESS\_CONDITION "RURAL"

EXIT INITIAL\_CONDITIONS

GAS\_COMPOSITION\_AND\_VOLUME

POSITION\_OF\_FUEL\_REGION   0       0       0

DIMENSION\_OF\_FUEL\_REGION   0       0       0

TOXIC\_SPECIFICATION       ""

VOLUME\_FRACTIONS

METHANE	92.5		
ACETYLENE	0		
ETHYLENE	0		
ETHANE	6.2		
PROPYLENE	0		
PROPANE	1.3		
BUTANE	0		
PENTANE	0		
HEXANE	0		
HEPTANE	0		
OCTANE	0		
NONANE	0		
DECANE	0		
HENDECANE	0		
DODECANE	0		
HYDROGEN	0		
CO	0		
H2S	0		
H2O	0		
CO2	0		
USERSPEC_1	0		
USERSPEC_2	0		
USERSPEC_3	0		
TOXIC	0		

EXIT VOLUME\_FRACTIONS

EQUIVALENCE\_RATIOS\_(ER0\_ER9) 1e+30 0

EXIT GAS\_COMPOSITION\_AND\_VOLUME

LEAKS

EXIT LEAKS

IGNITION

POSITION_OF_IGNITION_REGION	0	0	0
DIMENSION_OF_IGNITION_REGION	0	0	0
TIME_OF_IGNITION	9999		
RADMAX	0		

EXIT IGNITION

WATERSPRAY

EXIT WATERSPRAY

LOUVRE\_PANELS

EXIT LOUVRE\_PANELS

GRATING

EXIT GRATING

GAS\_MONITOR\_REGION

POSITION	0	0	0
----------	---	---	---

SIZE	0	0	0
------	---	---	---

EXIT GAS\_MONITOR\_REGION

SPECIES

EXIT SPECIES

EXIT

## Annex B: Resultats Can Padró

En aquest annex es mostren imatges de les simulacions de Can Padró.



*Figura 46. Imatge de l'experiment P25\_02 als 15 s de fuga.*



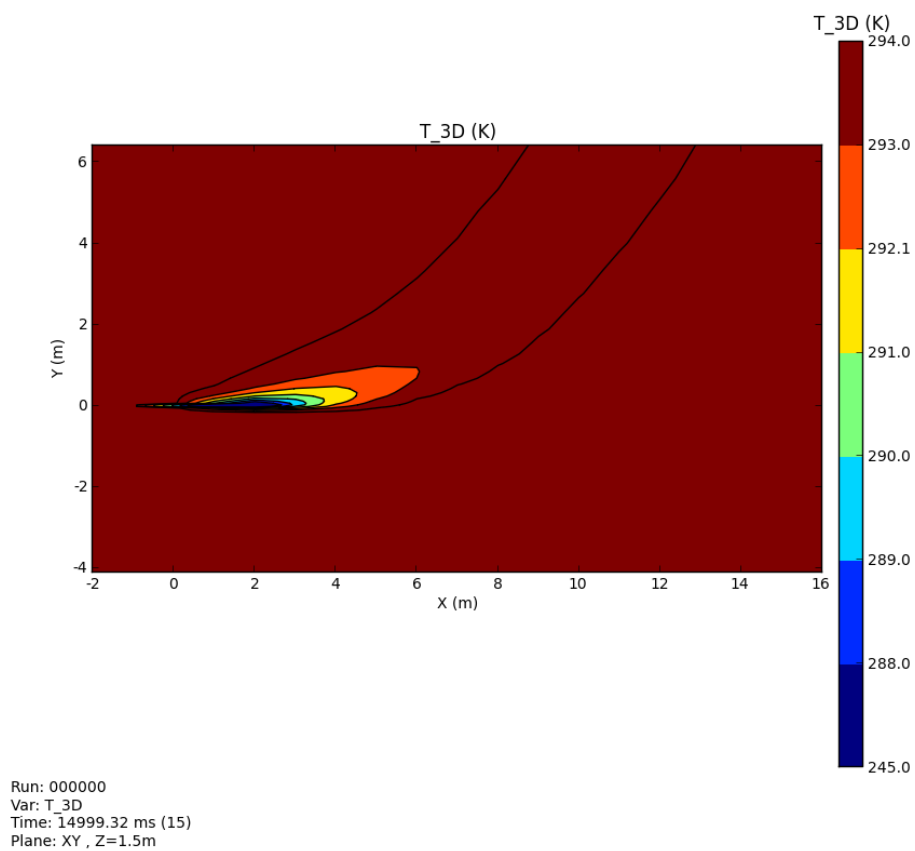
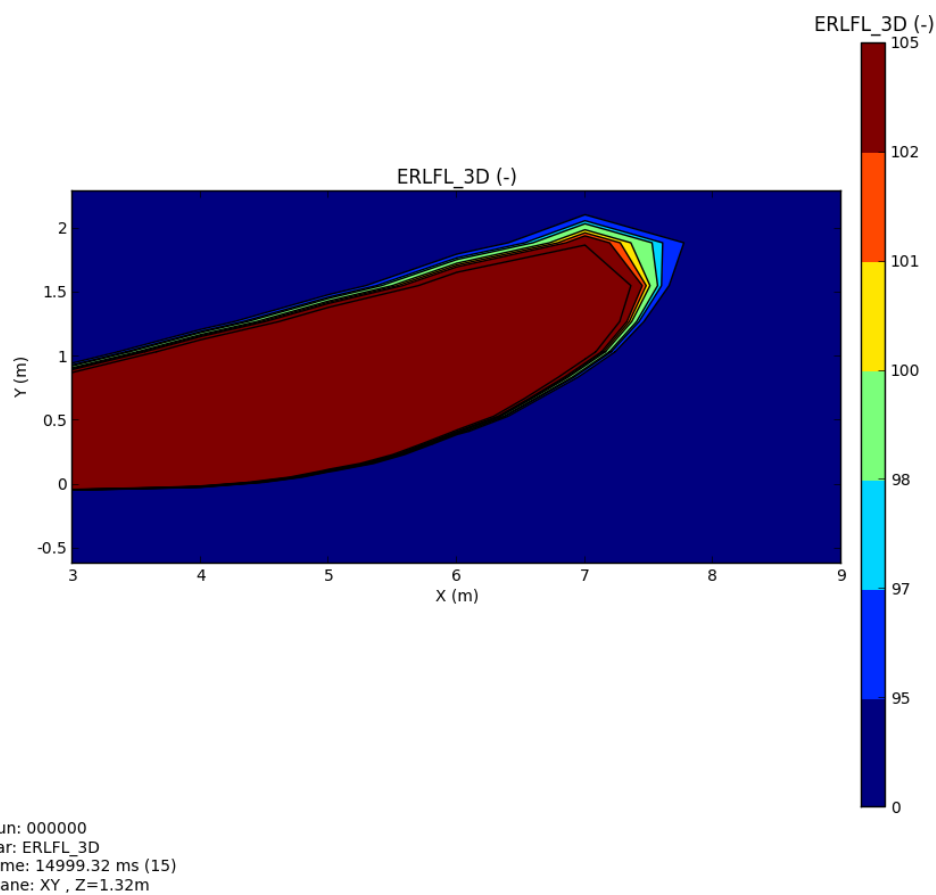


Figura 47. Perfils de temperatura de la simulació de P25\_02 als 15 s



*Figura 48. Perfils de distància on s'assoleix el LFL als 15 s de fuga per la simulació de l'experiment P25\_02*

## Annex C: Resultats experiments HSL

En aquest s'adjunten imatges reals dels experiments HSL e imatges de les simulacions realitzades per validar el programa FLACS.

### HSL 16



Figura 49. Imatge experiment HSL 16 als 2 segons [45]

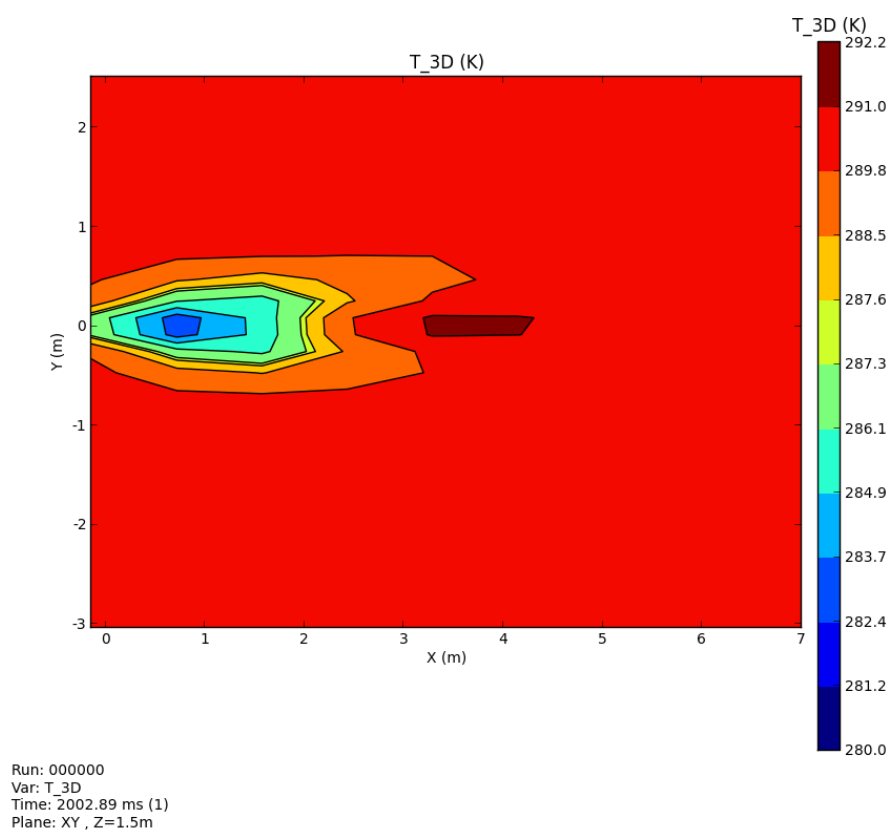


Figura 50. Perfils temperatura simulació als 2 segons a una alçada de 1,5 m



Figura 51. Imatge experiment HSL 16 als 81 segons [45]

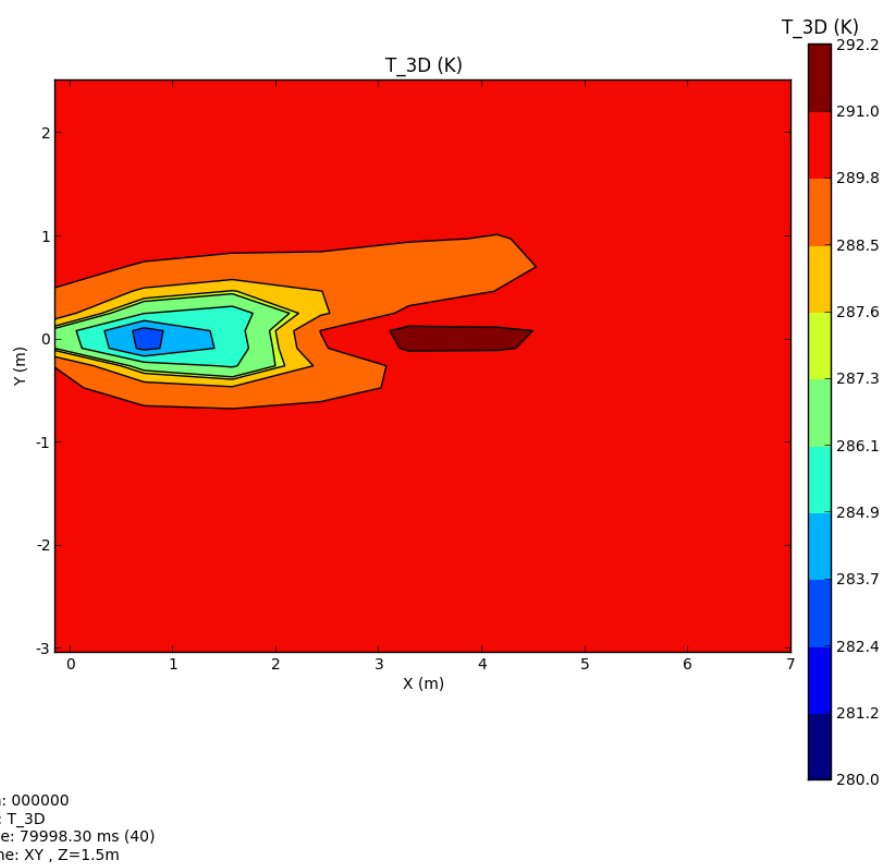


Figura 52. Perfils de temperatura obtinguts a la simulació HSL 16 als 80 segons

**HSL 23**

*Figura 53. Imatge experiment VCF23 als 2 segons [45]*

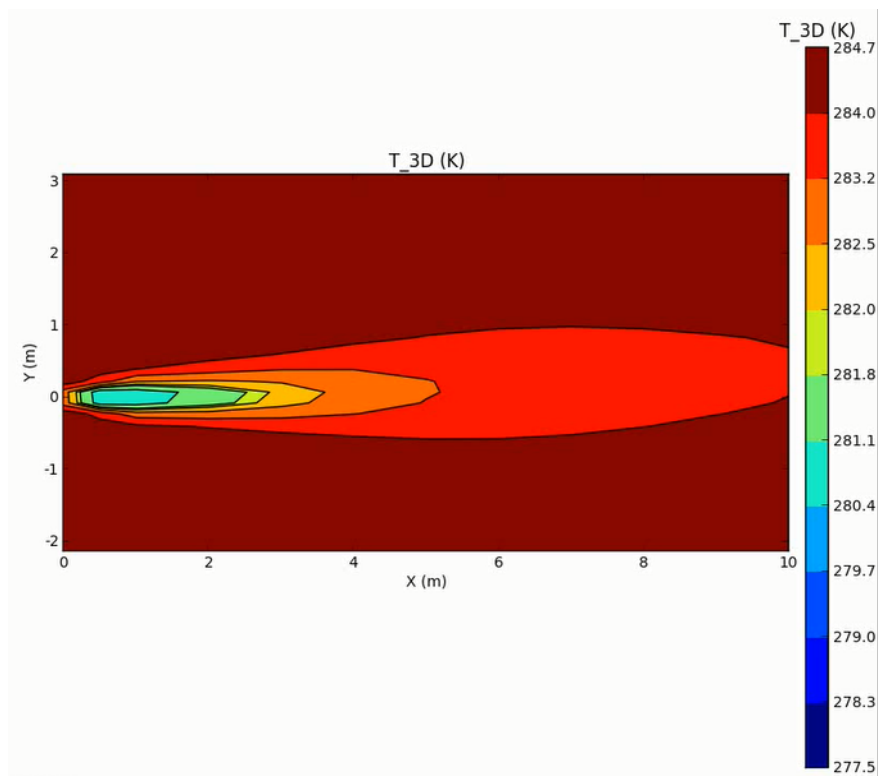


Figura 54. Dades temperatura simulació als 2 segons a 1,5 m d'alçada



Figura 55. Imatge experiment VCF23 als 30 segons [45]

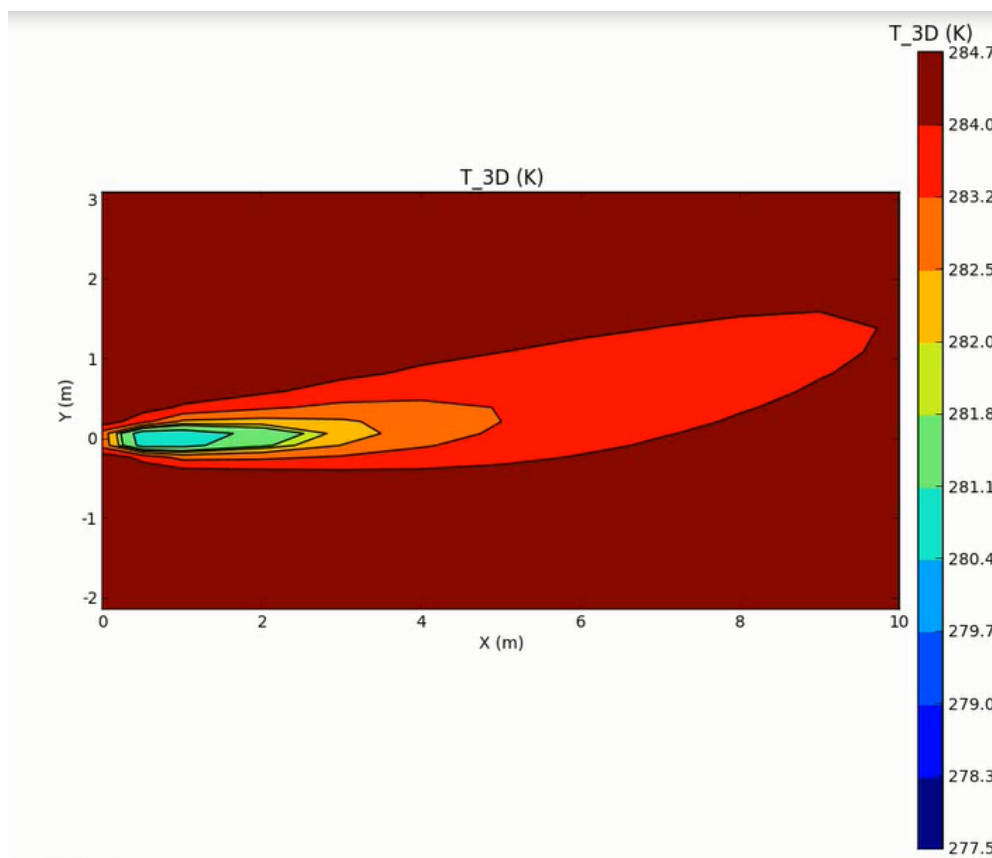
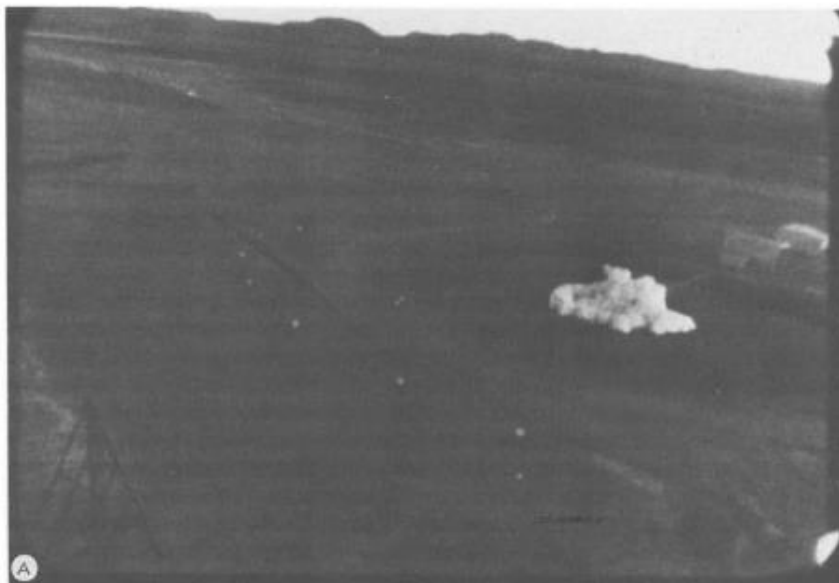


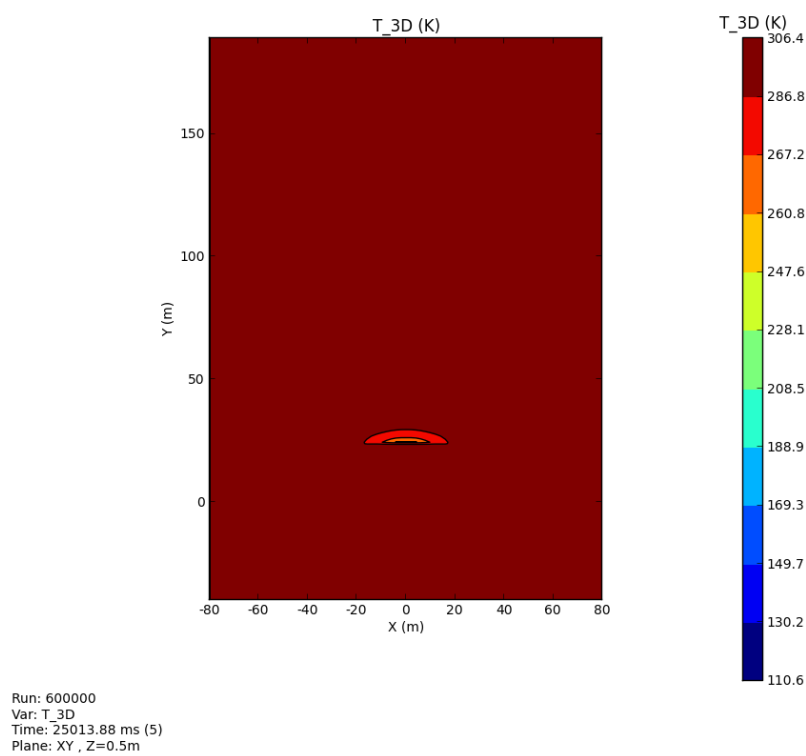
Figura 56. Dades temperatura simulació als 30 segons a 1,5 m d'alçada

## Annex D: Resultats experiments Burro i Maplin Sands

S'adjunten els perfils de temperatura i de percentatge del LFL obtinguts a les simulacions.

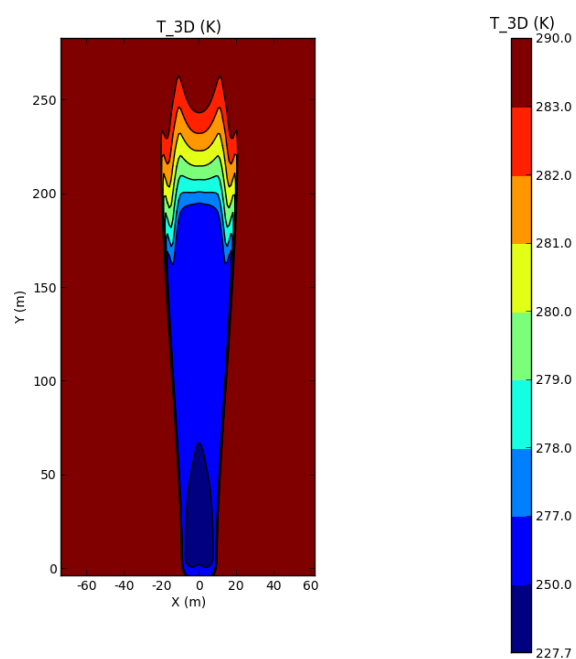
**Burro 8**

*Figura 57. Imatge de l'experiment de Burro 8 als 2 s [46]*



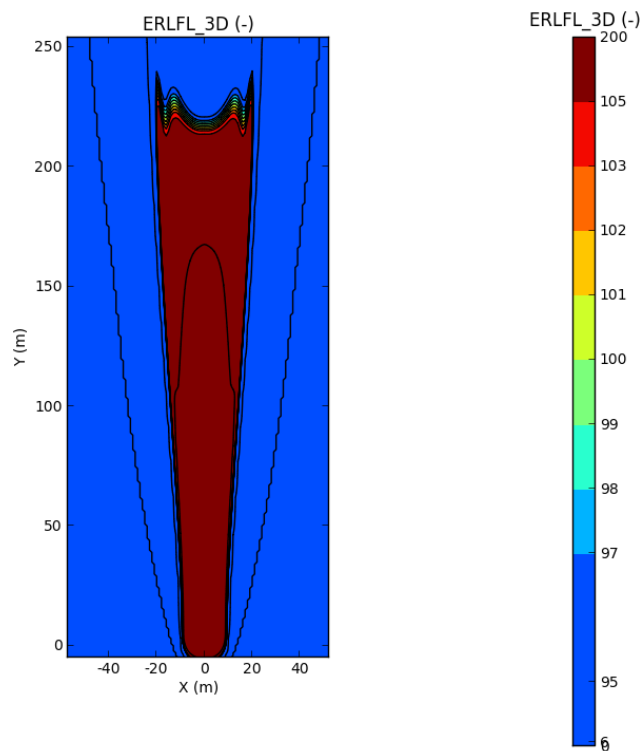
*Figura 58. Imatge dels perfils de temperatura de Burro 8 obtinguts a la simulació als 2 s*



**Maplin 29**

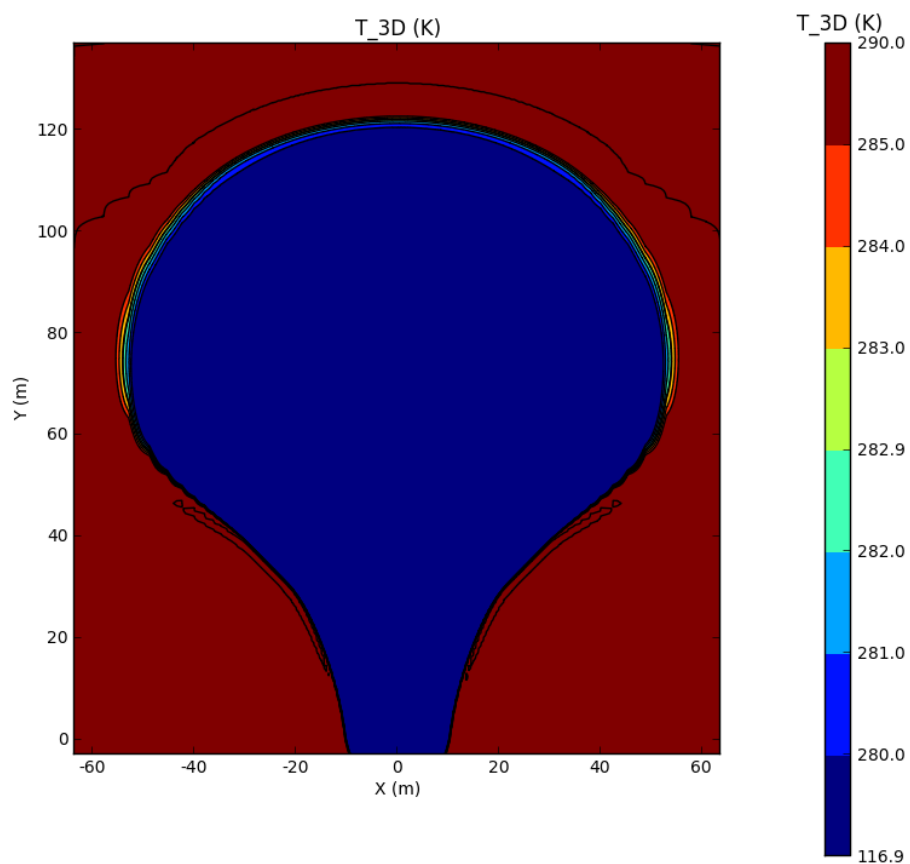
Run: 600000  
Var: T\_3D  
Time: 239989.94 ms (24)  
Plane: XY, Z=0.5m

*Figura 59. Perfils de temperatura obtinguts a la simulació de Maplin 29*



Run: 600000  
Var: ERLFL\_3D  
Time: 239989.94 ms (24)  
Plane: XY , Z=0.5m

*Figura 60. Perfils de percentatge del LFL obtinguts a la simulació de Maplin 29*

**Maplin 39**

*Figura 61. Perfils de temperatura obtinguts a la simulació de Maplin 39*

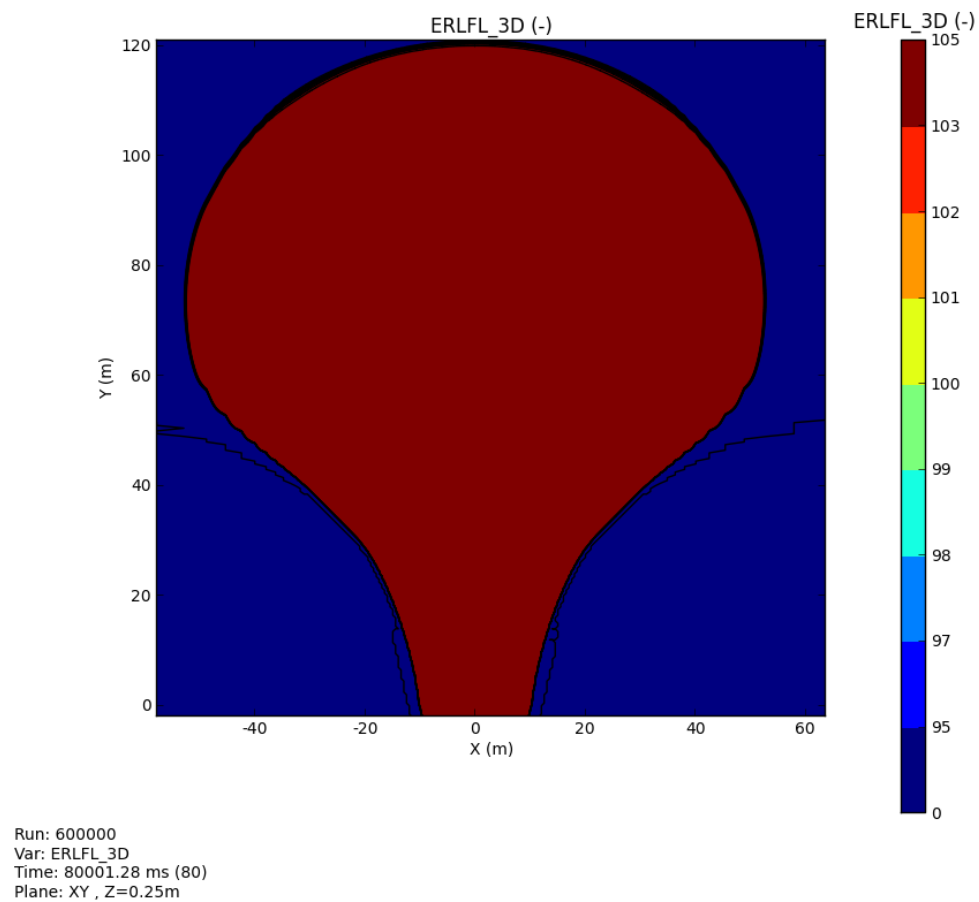
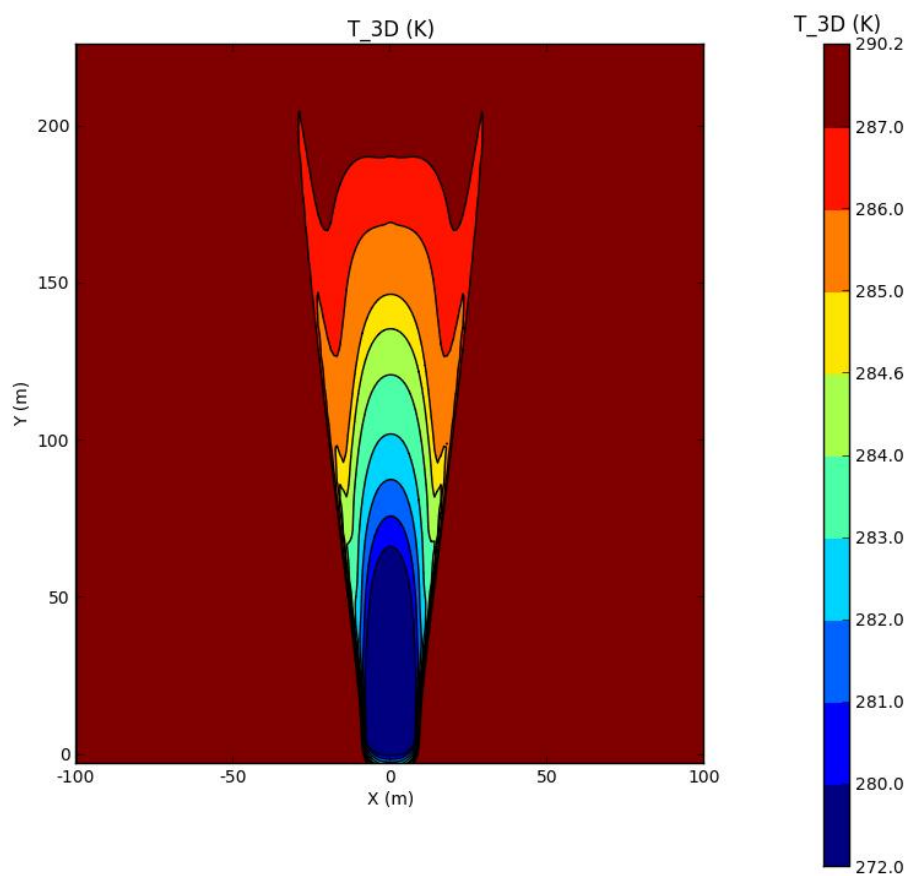
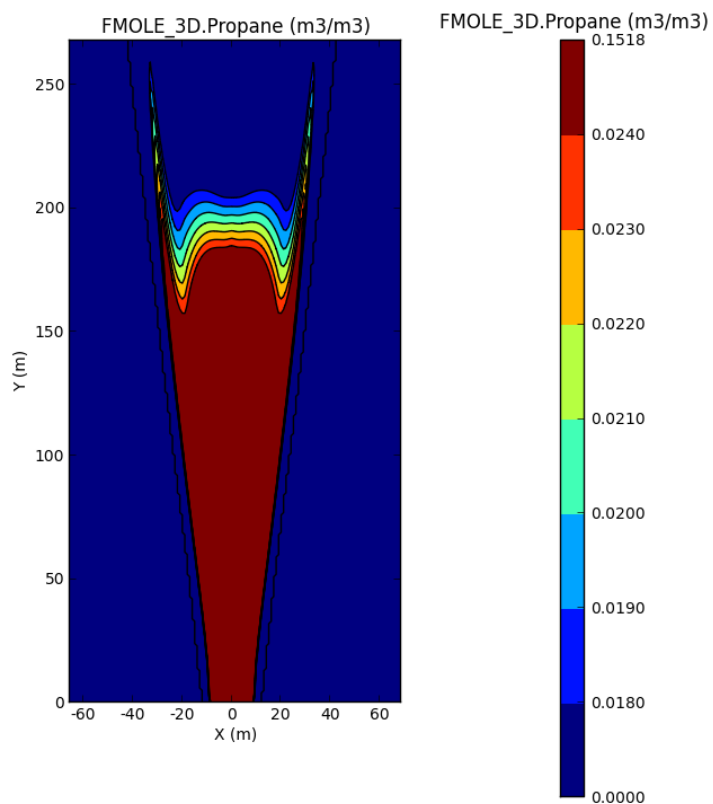


Figura 62. Perfils de percentatge del LFL obtinguts a la simulació de Maplin 39

**Maplin 43**

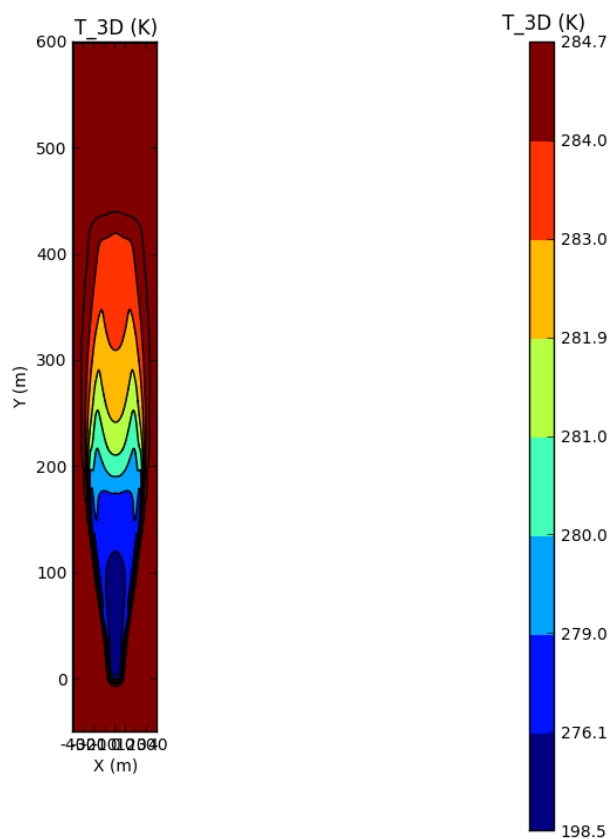
Run: 600000  
Var: T\_3D  
Time: 315008.03 ms (63)  
Plane: XY , Z=0.5m

*Figura 63. Perfils de temperatura obtinguts a la simulació de Maplin 43*



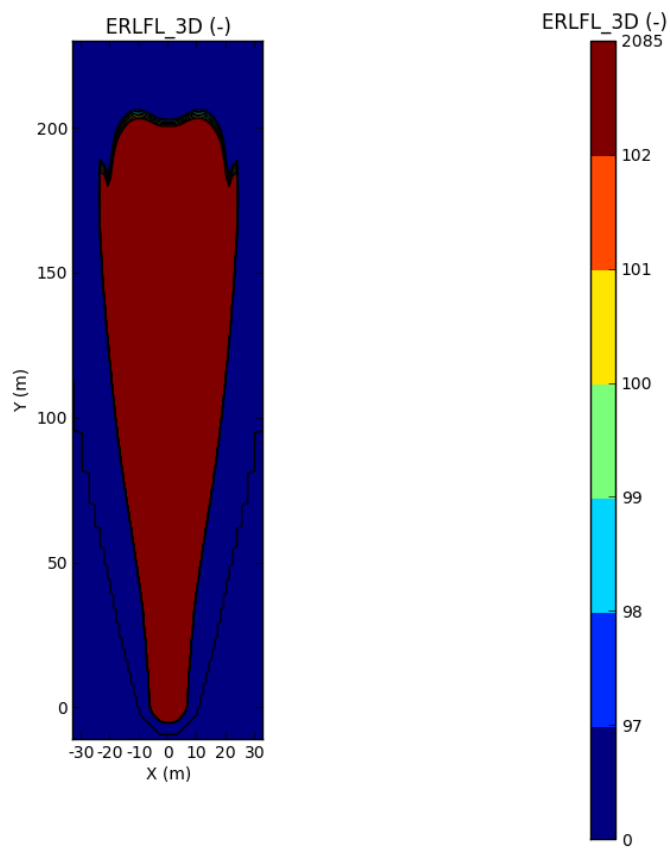
Run: 600000  
Var: FMOLE\_3D.Propane  
Time: 285023.94 ms (57)  
Plane: XY , Z=0.5m

*Figura 64. Perfils de concentració obtinguts a la simulació de Maplin 43*

**Maplin 56**

Run: 600000  
Var: T\_3D  
Time: 119998.40 ms (12)  
Plane: XY , Z=0.83m

*Figura 65. Perfils de temperatura obtinguts en la simulació de Maplin 56*



Run: 600000  
Var: ERLFL\_3D  
Time: 119998.40 ms (12)  
Plane: XY , Z=0.28m

Figura 66. Perfils del percentatge del LFL obtinguts a la simulació de Maplin 56



## **Annex E: Experiments GNL i propà**

En aquest annex s'adjunten els resultats de les simulacions de GNL i de propà realitzades per proposar una correlació per calcular el factor de seguretat DSF.



Taula 19. Resultats obtinguts a les simulacions de fuites de GNL

Cabal de fuita (kg/s)	Temperatura ambient (°C)	Velocitat del vent (m/s)	HR (%)	Distància 10% LFL (m)	Distància 50% LFL (m)	Distància LFL (m)	Distància visible (m)	DSF	DSF (50%)	DSF (10%)
15	5	2,0	4,9	58,81	56,34	55,47	52,18	1,06	1,08	1,13
15	5	2,0	5	58,81	56,34	55,47	52,20	1,06	1,08	1,13
15	5	2,0	5,5	58,81	56,34	55,47	52,32	1,06	1,08	1,12
15	5	2,0	10	58,81	56,34	55,47	53,05	1,05	1,06	1,11
15	5	2,0	20	58,81	56,34	55,47	53,86	1,03	1,05	1,09
15	5	2,0	30	58,81	56,34	55,47	54,40	1,02	1,04	1,08
15	5	2,0	40	58,81	56,34	55,47	54,82	1,01	1,03	1,07
15	5	2,0	50	58,81	56,34	55,47	55,29	1,00	1,02	1,06
15	5	2,0	60	58,81	56,34	55,47	55,64	1,00	1,01	1,06
15	5	2,0	70	58,81	56,34	55,47	56,01	0,99	1,01	1,05
15	5	2,0	80	58,81	56,34	55,47	56,66	0,98	0,99	1,04
15	5	2,0	90	58,81	56,34	55,47	57,62	0,96	0,98	1,02
15	5	2,0	99	58,81	56,34	55,47	59,67	0,93	0,94	0,99
15	5	2,0	100	58,81	56,34	55,47	59,98	0,92	0,94	0,98
15	5	10,0	4,9	251,38	82,49	45,32	11,09	4,09	7,44	22,67
15	5	10,0	5	251,38	82,49	45,32	11,15	4,06	7,40	22,55
15	5	10,0	5,5	251,38	82,49	45,32	11,46	3,96	7,20	21,95
15	5	10,0	10	251,38	82,49	45,32	13,76	3,29	5,99	18,27
15	5	10,0	20	251,38	82,49	45,32	17,82	2,54	4,63	14,10
15	5	10,0	30	251,38	82,49	45,32	22,24	2,04	3,71	11,30

15	5	10,0	40	251,38	82,49	45,32	28,14	1,61	2,93	8,93
15	5	10,0	50	251,38	82,49	45,32	39,58	1,14	2,08	6,35
15	5	10,0	60	251,38	82,49	45,32	60,52	0,75	1,36	4,15
15	5	10,0	70	251,38	82,49	45,32	75,96	0,60	1,09	3,31
15	5	10,0	80	251,38	82,49	45,32	155,45	0,29	0,53	1,62
15	5	10,0	90	251,38	82,49	45,32	174,73	0,26	0,47	1,44
15	5	10,0	99	251,38	82,49	45,32	184,78	0,25	0,45	1,36
15	5	10,0	100	251,38	82,49	45,32	185,95	0,24	0,44	1,35
15	40	2,0	4,9	60,01	57,87	56,96	52,84	1,08	1,10	1,14
15	40	2,0	5	60,01	57,87	56,96	52,91	1,08	1,09	1,13
15	40	2,0	5,5	60,01	57,87	56,96	53,13	1,07	1,09	1,13
15	40	2,0	10	60,01	57,87	56,96	54,22	1,05	1,07	1,11
15	40	2,0	20	60,01	57,87	56,96	55,24	1,03	1,05	1,09
15	40	2,0	30	60,01	57,87	56,96	55,83	1,02	1,04	1,07
15	40	2,0	40	60,01	57,87	56,96	56,32	1,01	1,03	1,07
15	40	2,0	50	60,01	57,87	56,96	56,74	1,00	1,02	1,06
15	40	2,0	60	60,01	57,87	56,96	57,14	1,00	1,01	1,05
15	40	2,0	70	60,01	57,87	56,96	57,64	0,99	1,00	1,04
15	40	2,0	80	60,01	57,87	56,96	58,18	0,98	0,99	1,03
15	40	2,0	90	60,01	57,87	56,96	59,12	0,96	0,98	1,02
15	40	2,0	99	60,01	57,87	56,96	61,22	0,93	0,95	0,98
15	40	2,0	100	60,01	57,87	56,96	61,76	0,92	0,94	0,97
15	40	10,0	4,9	241,31	94,96	54,45	12,82	4,25	7,41	18,83
15	40	10,0	5	241,31	94,96	54,45	12,89	4,23	7,37	18,73
15	40	10,0	5,5	241,31	94,96	54,45	13,27	4,10	7,16	18,19
15	40	10,0	10	241,31	94,96	54,45	16,20	3,36	5,86	14,90
15	40	10,0	20	241,31	94,96	54,45	21,72	2,51	4,37	11,11

15	40	10,0	30	241,31	94,96	54,45	28,59	1,90	3,32	8,44
15	40	10,0	40	241,31	94,96	54,45	36,57	1,49	2,60	6,60
15	40	10,0	50	241,31	94,96	54,45	46,04	1,18	2,06	5,24
15	40	10,0	60	241,31	94,96	54,45	59,57	0,91	1,59	4,05
15	40	10,0	70	241,31	94,96	54,45	82,81	0,66	1,15	2,91
15	40	10,0	80	241,31	94,96	54,45	113,26	0,48	0,84	2,13
15	40	10,0	90	241,31	94,96	54,45	226,54	0,24	0,42	1,07
15	40	10,0	99	241,31	94,96	54,45	278,33	0,20	0,34	0,87
15	40	10,0	100	241,31	94,96	54,45	284,51	0,19	0,33	0,85
120	5	2,0	4,9	60,88	58,97	58,40	55,89	1,04	1,06	1,09
120	5	2,0	5	60,88	58,97	58,40	55,91	1,04	1,05	1,09
120	5	2,0	5,5	60,88	58,97	58,40	56,00	1,04	1,05	1,09
120	5	2,0	10	60,88	58,97	58,40	56,49	1,03	1,04	1,08
120	5	2,0	20	60,88	58,97	58,40	57,12	1,02	1,03	1,07
120	5	2,0	30	60,88	58,97	58,40	57,54	1,01	1,02	1,06
120	5	2,0	40	60,88	58,97	58,40	57,86	1,01	1,02	1,05
120	5	2,0	50	60,88	58,97	58,40	58,24	1,00	1,01	1,05
120	5	2,0	60	60,88	58,97	58,40	58,54	1,00	1,01	1,04
120	5	2,0	70	60,88	58,97	58,40	58,84	0,99	1,00	1,03
120	5	2,0	80	60,88	58,97	58,40	59,28	0,99	0,99	1,03
120	5	2,0	90	60,88	58,97	58,40	59,91	0,97	0,98	1,02
120	5	2,0	99	60,88	58,97	58,40	61,69	0,95	0,96	0,99
120	5	2,0	100	60,88	58,97	58,40	62,00	0,94	0,95	0,98
120	5	10,0	4,9	251,78	158,72	92,23	25,87	3,57	6,14	9,73
120	5	10,0	5	251,78	158,72	92,23	25,98	3,55	6,11	9,69
120	5	10,0	5,5	251,78	158,72	92,23	26,55	3,47	5,98	9,48
120	5	10,0	10	251,78	158,72	92,23	31,43	2,93	5,05	8,01

120	5	10,0	20	251,78	158,72	92,23	44,44	2,08	3,57	5,67
120	5	10,0	30	251,78	158,72	92,23	59,68	1,55	2,66	4,22
120	5	10,0	40	251,78	158,72	92,23	72,77	1,27	2,18	3,46
120	5	10,0	50	251,78	158,72	92,23	84,23	1,09	1,88	2,99
120	5	10,0	60	251,78	158,72	92,23	91,88	1,00	1,73	2,74
120	5	10,0	70	251,78	158,72	92,23	161,01	0,57	0,99	1,56
120	5	10,0	80	251,78	158,72	92,23	174,90	0,53	0,91	1,44
120	5	10,0	90	251,78	158,72	92,23	184,38	0,50	0,86	1,37
120	5	10,0	99	251,78	158,72	92,23	193,29	0,48	0,82	1,30
120	5	10,0	100	251,78	158,72	92,23	194,58	0,47	0,82	1,29
120	40	2,0	4,9	61,76	60,28	59,61	56,74	1,05	1,06	1,09
120	40	2,0	5	61,76	60,28	59,61	56,76	1,05	1,06	1,09
120	40	2,0	5,5	61,76	60,28	59,61	56,88	1,05	1,06	1,09
120	40	2,0	10	61,76	60,28	59,61	57,47	1,04	1,05	1,07
120	40	2,0	20	61,76	60,28	59,61	58,19	1,02	1,04	1,06
120	40	2,0	30	61,76	60,28	59,61	58,65	1,02	1,03	1,05
120	40	2,0	40	61,76	60,28	59,61	58,99	1,01	1,02	1,05
120	40	2,0	50	61,76	60,28	59,61	59,38	1,00	1,02	1,04
120	40	2,0	60	61,76	60,28	59,61	59,71	1,00	1,01	1,03
120	40	2,0	70	61,76	60,28	59,61	60,00	0,99	1,00	1,03
120	40	2,0	80	61,76	60,28	59,61	60,54	0,98	1,00	1,02
120	40	2,0	90	61,76	60,28	59,61	61,09	0,98	0,99	1,01
120	40	2,0	99	61,76	60,28	59,61	62,73	0,95	0,96	0,98
120	40	2,0	100	61,76	60,28	59,61	63,21	0,94	0,95	0,98
120	40	10,0	4,9	251,32	173,48	109,32	31,19	3,51	5,56	8,06
120	40	10,0	5	251,32	173,48	109,32	31,36	3,49	5,53	8,01
120	40	10,0	5,5	251,32	173,48	109,32	32,19	3,40	5,39	7,81

120	40	10,0	10	251,32	173,48	109,32	39,27	2,78	4,42	6,40
120	40	10,0	20	251,32	173,48	109,32	50,95	2,15	3,40	4,93
120	40	10,0	30	251,32	173,48	109,32	64,30	1,70	2,70	3,91
120	40	10,0	40	251,32	173,48	109,32	81,01	1,35	2,14	3,10
120	40	10,0	50	251,32	173,48	109,32	96,63	1,13	1,80	2,60
120	40	10,0	60	251,32	173,48	109,32	121,78	0,90	1,42	2,06
120	40	10,0	70	251,32	173,48	109,32	146,87	0,74	1,18	1,71
120	40	10,0	80	251,32	173,48	109,32	219,72	0,50	0,79	1,14
120	40	10,0	90	251,32	173,48	109,32	244,32	0,45	0,71	1,03
120	40	10,0	99	251,32	173,48	109,32	278,62	0,39	0,62	0,90
120	40	10,0	100	251,32	173,48	109,32	284,78	0,38	0,61	0,88
15	5	4,5	4,9	118,19	99,25	87,58	38,14	2,30	2,60	3,10
15	5	4,5	5	118,19	99,25	87,58	38,29	2,29	2,59	3,09
15	5	4,5	5,5	118,19	99,25	87,58	39,03	2,24	2,54	3,03
15	5	4,5	10	118,19	99,25	87,58	43,82	2,00	2,26	2,70
15	5	4,5	20	118,19	99,25	87,58	54,30	1,61	1,83	2,18
15	5	4,5	30	118,19	99,25	87,58	76,63	1,14	1,30	1,54
15	5	4,5	40	118,19	99,25	87,58	81,63	1,07	1,22	1,45
15	5	4,5	50	118,19	99,25	87,58	85,91	1,02	1,16	1,38
15	5	4,5	60	118,19	99,25	87,58	89,61	0,98	1,11	1,32
15	5	4,5	70	118,19	99,25	87,58	97,19	0,90	1,02	1,22
15	5	4,5	80	118,19	99,25	87,58	108,78	0,81	0,91	1,09
15	5	4,5	90	118,19	99,25	87,58	116,77	0,75	0,85	1,01
15	5	4,5	99	118,19	99,25	87,58	124,70	0,70	0,80	0,95
15	5	4,5	100	118,19	99,25	87,58	126,95	0,69	0,78	0,93
15	5	7,0	4,9	175,62	129,76	66,26	16,96	3,91	7,65	10,35
15	5	7,0	5	175,62	129,76	66,26	17,05	3,89	7,61	10,30

15	5	7,0	5,5	175,62	129,76	66,26	17,50	3,79	7,42	10,04
15	5	7,0	10	175,62	129,76	66,26	20,80	3,19	6,24	8,44
15	5	7,0	20	175,62	129,76	66,26	27,45	2,41	4,73	6,40
15	5	7,0	30	175,62	129,76	66,26	36,27	1,83	3,58	4,84
15	5	7,0	40	175,62	129,76	66,26	50,40	1,31	2,57	3,48
15	5	7,0	50	175,62	129,76	66,26	63,94	1,04	2,03	2,75
15	5	7,0	60	175,62	129,76	66,26	71,71	0,92	1,81	2,45
15	5	7,0	70	175,62	129,76	66,26	122,35	0,54	1,06	1,44
15	5	7,0	80	175,62	129,76	66,26	135,32	0,49	0,96	1,30
15	5	7,0	90	175,62	129,76	66,26	180,11	0,37	0,72	0,98
15	5	7,0	99	175,62	129,76	66,26	193,83	0,34	0,67	0,91
15	5	7,0	100	175,62	129,76	66,26	197,48	0,34	0,66	0,89
15	40	4,5	4,9	119,34	101,60	91,19	47,95	1,90	2,12	2,49
15	40	4,5	5	119,34	101,60	91,19	48,15	1,89	2,11	2,48
15	40	4,5	5,5	119,34	101,60	91,19	49,12	1,86	2,07	2,43
15	40	4,5	10	119,34	101,60	91,19	55,01	1,66	1,85	2,17
15	40	4,5	20	119,34	101,60	91,19	73,02	1,25	1,39	1,63
15	40	4,5	30	119,34	101,60	91,19	80,70	1,13	1,26	1,48
15	40	4,5	40	119,34	101,60	91,19	85,41	1,07	1,19	1,40
15	40	4,5	50	119,34	101,60	91,19	89,68	1,02	1,13	1,33
15	40	4,5	60	119,34	101,60	91,19	94,67	0,96	1,07	1,26
15	40	4,5	70	119,34	101,60	91,19	102,61	0,89	0,99	1,16
15	40	4,5	80	119,34	101,60	91,19	112,10	0,81	0,91	1,06
15	40	4,5	90	119,34	101,60	91,19	120,68	0,76	0,84	0,99
15	40	4,5	99	119,34	101,60	91,19	639,50	0,14	0,16	0,19
15	40	4,5	100	119,34	101,60	91,19	783,51	0,12	0,13	0,15
15	40	7,0	4,9	174,04	137,00	75,82	20,43	3,71	6,71	8,52



15	40	7,0	5	174,04	137,00	75,82	20,54	3,69	6,67	8,47
15	40	7,0	5,5	174,04	137,00	75,82	21,06	3,60	6,51	8,26
15	40	7,0	10	174,04	137,00	75,82	25,47	2,98	5,38	6,83
15	40	7,0	20	174,04	137,00	75,82	34,45	2,20	3,98	5,05
15	40	7,0	30	174,04	137,00	75,82	46,05	1,65	2,98	3,78
15	40	7,0	40	174,04	137,00	75,82	58,88	1,29	2,33	2,96
15	40	7,0	50	174,04	137,00	75,82	69,87	1,09	1,96	2,49
15	40	7,0	60	174,04	137,00	75,82	79,54	0,95	1,72	2,19
15	40	7,0	70	174,04	137,00	75,82	131,46	0,58	1,04	1,32
15	40	7,0	80	174,04	137,00	75,82	141,94	0,53	0,97	1,23
15	40	7,0	90	174,04	137,00	75,82	178,97	0,42	0,77	0,97
15	40	7,0	99	174,04	137,00	75,82	557,60	0,14	0,25	0,31
15	40	7,0	100	174,04	137,00	75,82	737,83	0,10	0,19	0,24
120	5	4,5	4,9	119,54	106,18	95,20	62,94	1,51	1,69	1,90
120	5	4,5	5	119,54	106,18	95,20	63,16	1,51	1,68	1,89
120	5	4,5	5,5	119,54	106,18	95,20	64,21	1,48	1,65	1,86
120	5	4,5	10	119,54	106,18	95,20	71,28	1,34	1,49	1,68
120	5	4,5	20	119,54	106,18	95,20	79,52	1,20	1,34	1,50
120	5	4,5	30	119,54	106,18	95,20	84,32	1,13	1,26	1,42
120	5	4,5	40	119,54	106,18	95,20	88,59	1,07	1,20	1,35
120	5	4,5	50	119,54	106,18	95,20	93,96	1,01	1,13	1,27
120	5	4,5	60	119,54	106,18	95,20	99,32	0,96	1,07	1,20
120	5	4,5	70	119,54	106,18	95,20	106,24	0,90	1,00	1,13
120	5	4,5	80	119,54	106,18	95,20	112,44	0,85	0,94	1,06
120	5	4,5	90	119,54	106,18	95,20	118,21	0,81	0,90	1,01
120	5	4,5	99	119,54	106,18	95,20	124,82	0,76	0,85	0,96
120	5	4,5	100	119,54	106,18	95,20	126,80	0,75	0,84	0,94

120	5	7,0	4,9	179,26	150,58	117,00	40,40	2,90	3,73	4,44
120	5	7,0	5	179,26	150,58	117,00	40,63	2,88	3,71	4,41
120	5	7,0	5,5	179,26	150,58	117,00	41,73	2,80	3,61	4,30
120	5	7,0	10	179,26	150,58	117,00	50,89	2,30	2,96	3,52
120	5	7,0	20	179,26	150,58	117,00	65,83	1,78	2,29	2,72
120	5	7,0	30	179,26	150,58	117,00	74,89	1,56	2,01	2,39
120	5	7,0	40	179,26	150,58	117,00	82,60	1,42	1,82	2,17
120	5	7,0	50	179,26	150,58	117,00	117,00	1,00	1,29	1,53
120	5	7,0	60	179,26	150,58	117,00	128,00	0,91	1,18	1,40
120	5	7,0	70	179,26	150,58	117,00	136,30	0,86	1,10	1,32
120	5	7,0	80	179,26	150,58	117,00	171,38	0,68	0,88	1,05
120	5	7,0	90	179,26	150,58	117,00	181,85	0,64	0,83	0,99
120	5	7,0	99	179,26	150,58	117,00	194,08	0,60	0,78	0,92
120	5	7,0	100	179,26	150,58	117,00	197,64	0,59	0,76	0,91
120	40	4,5	4,9	120,43	109,04	101,87	59,36	1,72	1,84	2,03
120	40	4,5	5	120,43	109,04	101,87	59,50	1,71	1,83	2,02
120	40	4,5	5,5	120,43	109,04	101,87	60,18	1,69	1,81	2,00
120	40	4,5	10	120,43	109,04	101,87	82,58	1,23	1,32	1,46
120	40	4,5	20	120,43	109,04	101,87	91,73	1,11	1,19	1,31
120	40	4,5	30	120,43	109,04	101,87	95,50	1,07	1,14	1,26
120	40	4,5	40	120,43	109,04	101,87	98,46	1,03	1,11	1,22
120	40	4,5	50	120,43	109,04	101,87	101,49	1,00	1,07	1,19
120	40	4,5	60	120,43	109,04	101,87	105,20	0,97	1,04	1,14
120	40	4,5	70	120,43	109,04	101,87	110,06	0,93	0,99	1,09
120	40	4,5	80	120,43	109,04	101,87	115,68	0,88	0,94	1,04
120	40	4,5	90	120,43	109,04	101,87	121,29	0,84	0,90	0,99
120	40	4,5	99	120,43	109,04	101,87	638,54	0,16	0,17	0,19

120	40	4,5	100	120,43	109,04	101,87	783,27	0,13	0,14	0,15
120	40	7,0	4,9	179,11	157,85	133,03	49,89	2,67	3,16	3,59
120	40	7,0	5	179,11	157,85	133,03	50,16	2,65	3,15	3,57
120	40	7,0	5,5	179,11	157,85	133,03	51,53	2,58	3,06	3,48
120	40	7,0	10	179,11	157,85	133,03	62,19	2,14	2,54	2,88
120	40	7,0	20	179,11	157,85	133,03	76,71	1,73	2,06	2,34
120	40	7,0	30	179,11	157,85	133,03	86,20	1,54	1,83	2,08
120	40	7,0	40	179,11	157,85	133,03	101,15	1,32	1,56	1,77
120	40	7,0	50	179,11	157,85	133,03	128,85	1,03	1,23	1,39
120	40	7,0	60	179,11	157,85	133,03	141,03	0,94	1,12	1,27
120	40	7,0	70	179,11	157,85	133,03	155,67	0,85	1,01	1,15
120	40	7,0	80	179,11	157,85	133,03	174,39	0,76	0,91	1,03
120	40	7,0	90	179,11	157,85	133,03	187,16	0,71	0,84	0,96
120	40	7,0	99	179,11	157,85	133,03	656,86	0,20	0,24	0,27
120	40	7,0	100	179,11	157,85	133,03	769,78	0,17	0,21	0,23
15	5	25,0	4,9	162,93	40,62	22,65	-	-	-	-
15	5	25,0	5	162,93	40,62	22,65	-	-	-	-
15	5	25,0	5,5	162,93	40,62	22,65	6,55	3,46	6,21	24,89
15	5	25,0	10	162,93	40,62	22,65	9,66	2,35	4,21	16,88
15	5	25,0	20	162,93	40,62	22,65	12,83	1,77	3,17	12,70
15	5	25,0	30	162,93	40,62	22,65	16,65	1,36	2,44	9,79
15	5	25,0	40	162,93	40,62	22,65	22,47	1,01	1,81	7,25
15	5	25,0	50	162,93	40,62	22,65	28,80	0,79	1,41	5,66
15	5	25,0	60	162,93	40,62	22,65	39,77	0,57	1,02	4,10
15	5	25,0	70	162,93	40,62	22,65	57,37	0,39	0,71	2,84
15	5	25,0	80	162,93	40,62	22,65	670,84	0,03	0,06	0,24
15	5	25,0	90	162,93	40,62	22,65	704,53	0,03	0,06	0,23

15	5	25,0	99	162,93	40,62	22,65	750,24	0,03	0,05	0,22
15	5	25,0	100	162,93	40,62	22,65	766,87	0,03	0,05	0,21
120	5	25,0	4,9	417,45	86,79	47,41	14,29	3,32	6,07	29,22
120	5	25,0	5	417,45	86,79	47,41	14,36	3,30	6,05	29,08
120	5	25,0	5,5	417,45	86,79	47,41	14,68	3,23	5,91	28,43
120	5	25,0	10	417,45	86,79	47,41	17,28	2,74	5,02	24,16
120	5	25,0	20	417,45	86,79	47,41	22,66	2,09	3,83	18,43
120	5	25,0	30	417,45	86,79	47,41	28,75	1,65	3,02	14,52
120	5	25,0	40	417,45	86,79	47,41	36,40	1,30	2,38	11,47
120	5	25,0	50	417,45	86,79	47,41	46,44	1,02	1,87	8,99
120	5	25,0	60	417,45	86,79	47,41	57,25	0,83	1,52	7,29
120	5	25,0	70	417,45	86,79	47,41	74,08	0,64	1,17	5,64
120	5	25,0	80	417,45	86,79	47,41	670,71	0,07	0,13	0,62
120	5	25,0	90	417,45	86,79	47,41	704,91	0,07	0,12	0,59
120	5	25,0	99	417,45	86,79	47,41	750,74	0,06	0,12	0,56
120	5	25,0	100	417,45	86,79	47,41	767,16	0,06	0,11	0,54
15	40	25,0	4,9	181,06	47,36	26,43	-	-	-	-
15	40	25,0	5	181,06	47,36	26,43	5,05	5,24	9,39	35,89
15	40	25,0	5,5	181,06	47,36	26,43	5,38	4,91	8,80	33,64
15	40	25,0	10	181,06	47,36	26,43	7,41	3,57	6,39	24,44
15	40	25,0	20	181,06	47,36	26,43	10,71	2,47	4,42	16,91
15	40	25,0	30	181,06	47,36	26,43	14,13	1,87	3,35	12,81
15	40	25,0	40	181,06	47,36	26,43	18,24	1,45	2,60	9,93
15	40	25,0	50	181,06	47,36	26,43	23,67	1,12	2,00	7,65
15	40	25,0	60	181,06	47,36	26,43	31,70	0,83	1,49	5,71
15	40	25,0	70	181,06	47,36	26,43	47,35	0,56	1,00	3,82
15	40	25,0	80	181,06	47,36	26,43	94,54	0,28	0,50	1,92

15	40	25,0	90	181,06	47,36	26,43	727,91	0,04	0,07	0,25
15	40	25,0	99	181,06	47,36	26,43	785,76	0,03	0,06	0,23
15	40	25,0	100	181,06	47,36	26,43	793,91	0,03	0,06	0,23
120	40	25,0	4,9	466,11	104,16	56,04	15,45	3,63	6,74	30,18
120	40	25,0	5	466,11	104,16	56,04	15,52	3,61	6,71	30,04
120	40	25,0	5,5	466,11	104,16	56,04	15,88	3,53	6,56	29,36
120	40	25,0	10	466,11	104,16	56,04	18,81	2,98	5,54	24,79
120	40	25,0	20	466,11	104,16	56,04	24,95	2,25	4,18	18,69
120	40	25,0	30	466,11	104,16	56,04	32,68	1,72	3,19	14,26
120	40	25,0	40	466,11	104,16	56,04	41,98	1,34	2,48	11,10
120	40	25,0	50	466,11	104,16	56,04	54,62	1,03	1,91	8,53
120	40	25,0	60	466,11	104,16	56,04	75,31	0,74	1,38	6,19
120	40	25,0	70	466,11	104,16	56,04	101,62	0,55	1,02	4,59
120	40	25,0	80	466,11	104,16	56,04	659,12	0,09	0,16	0,71
120	40	25,0	90	466,11	104,16	56,04	704,90	0,08	0,15	0,66
120	40	25,0	99	466,11	104,16	56,04	747,65	0,07	0,14	0,62
120	40	25,0	100	466,11	104,16	56,04	767,12	0,07	0,14	0,61
15	5	15,0	4,9	276,06	57,51	32,64	8,21	3,97	7,00	33,61
15	5	15,0	5	276,06	57,51	32,64	8,27	3,94	6,95	33,36
15	5	15,0	5,5	276,06	57,51	32,64	8,57	3,81	6,72	32,23
15	5	15,0	10	276,06	57,51	32,64	10,74	3,04	5,35	25,70
15	5	15,0	20	276,06	57,51	32,64	14,79	2,21	3,89	18,66
15	5	15,0	30	276,06	57,51	32,64	19,29	1,69	2,98	14,31
15	5	15,0	40	276,06	57,51	32,64	24,47	1,33	2,35	11,28
15	5	15,0	50	276,06	57,51	32,64	31,50	1,04	1,83	8,76
15	5	15,0	60	276,06	57,51	32,64	37,84	0,86	1,52	7,30
15	5	15,0	70	276,06	57,51	32,64	46,76	0,70	1,23	5,90

15	5	15,0	80	276,06	57,51	32,64	381,34	0,09	0,15	0,72
15	5	15,0	90	276,06	57,51	32,64	406,01	0,08	0,14	0,68
15	5	15,0	99	276,06	57,51	32,64	425,50	0,08	0,14	0,65
15	5	15,0	100	276,06	57,51	32,64	429,87	0,08	0,13	0,64
120	5	15,0	4,9	370,25	133,22	68,45	20,00	3,42	6,66	18,51
120	5	15,0	5	370,25	133,22	68,45	20,10	3,41	6,63	18,42
120	5	15,0	5,5	370,25	133,22	68,45	20,57	3,33	6,48	18,00
120	5	15,0	10	370,25	133,22	68,45	24,54	2,79	5,43	15,09
120	5	15,0	20	370,25	133,22	68,45	32,70	2,09	4,07	11,32
120	5	15,0	30	370,25	133,22	68,45	39,50	1,73	3,37	9,37
120	5	15,0	40	370,25	133,22	68,45	47,21	1,45	2,82	7,84
120	5	15,0	50	370,25	133,22	68,45	58,39	1,17	2,28	6,34
120	5	15,0	60	370,25	133,22	68,45	68,11	1,00	1,96	5,44
120	5	15,0	70	370,25	133,22	68,45	144,74	0,47	0,92	2,56
120	5	15,0	80	370,25	133,22	68,45	385,80	0,18	0,35	0,96
120	5	15,0	90	370,25	133,22	68,45	406,22	0,17	0,33	0,91
120	5	15,0	99	370,25	133,22	68,45	425,59	0,16	0,31	0,87
120	5	15,0	100	370,25	133,22	68,45	429,95	0,16	0,31	0,86
15	40	15,0	4,9	290,97	68,82	37,48	8,88	4,22	7,75	32,76
15	40	15,0	5	290,97	68,82	37,48	8,95	4,19	7,69	32,52
15	40	15,0	5,5	290,97	68,82	37,48	9,31	4,03	7,39	31,26
15	40	15,0	10	290,97	68,82	37,48	11,97	3,13	5,75	24,32
15	40	15,0	20	290,97	68,82	37,48	16,77	2,23	4,10	17,35
15	40	15,0	30	290,97	68,82	37,48	22,45	1,67	3,07	12,96
15	40	15,0	40	290,97	68,82	37,48	29,77	1,26	2,31	9,77
15	40	15,0	50	290,97	68,82	37,48	39,55	0,95	1,74	7,36
15	40	15,0	60	290,97	68,82	37,48	51,58	0,73	1,33	5,64

15	40	15,0	70	290,97	68,82	37,48	65,15	0,58	1,06	4,47
15	40	15,0	80	290,97	68,82	37,48	384,51	0,10	0,18	0,76
15	40	15,0	90	290,97	68,82	37,48	414,15	0,09	0,17	0,70
15	40	15,0	99	290,97	68,82	37,48	615,95	0,06	0,11	0,47
15	40	15,0	100	290,97	68,82	37,48	715,60	0,05	0,10	0,41
120	40	15,0	4,90	374,99	154,26	81,46	22,09	3,69	6,98	16,97
120	40	15,0	5,00	374,99	154,26	81,46	22,22	3,67	6,94	16,87
120	40	15,0	5,50	374,99	154,26	81,46	22,85	3,57	6,75	16,41
120	40	15,0	10,00	374,99	154,26	81,46	28,65	2,84	5,38	13,09
120	40	15,0	20,00	374,99	154,26	81,46	38,27	2,13	4,03	9,80
120	40	15,0	30,00	374,99	154,26	81,46	48,43	1,68	3,19	7,74
120	40	15,0	40,00	374,99	154,26	81,46	60,37	1,35	2,56	6,21
120	40	15,0	50,00	374,99	154,26	81,46	71,90	1,13	2,15	5,22
120	40	15,0	60,00	374,99	154,26	81,46	88,55	0,92	1,74	4,23
120	40	15,0	70,00	374,99	154,26	81,46	168,87	0,48	0,91	2,22
120	40	15,0	80,00	374,99	154,26	81,46	389,79	0,21	0,40	0,96
120	40	15,0	90,00	374,99	154,26	81,46	414,23	0,20	0,37	0,91
120	40	15,0	99,00	374,99	154,26	81,46	615,95	0,13	0,25	0,61
120	40	15,0	100,00	374,99	154,26	81,46	715,57	0,11	0,22	0,52

Taula 20. Resultats obtinguts a les simulacions de fuites de propà

Cabal de fuita (kg/s)	Temperatura ambient (°C)	Velocitat del vent (m/s)	HR (%)	Distància LFL (m)	Distància 10% LFL (m)	Distància 50% LFL (m)	Distància visible (m)	DSF (LFL)	DSF (50%)	DSF (10%)
15	5	2,0	3,5	55,46	57,22	56,01	9,88	5,62	5,67	5,79
15	5	2,0	5	55,46	57,22	56,01	12,52	4,43	4,47	4,57
15	5	2,0	5,5	55,46	57,22	56,01	13,48	4,11	4,16	4,24
15	5	2,0	10	55,46	57,22	56,01	20,37	2,72	2,75	2,81
15	5	2,0	20	55,46	57,22	56,01	34,19	1,62	1,64	1,67
15	5	2,0	30	55,46	57,22	56,01	38,92	1,43	1,44	1,47
15	5	2,0	40	55,46	57,22	56,01	45,95	1,21	1,22	1,25
15	5	2,0	50	55,46	57,22	56,01	52,15	1,06	1,07	1,10
15	5	2,0	60	55,46	57,22	56,01	53,43	1,04	1,05	1,07
15	5	2,0	70	55,46	57,22	56,01	54,29	1,02	1,03	1,05
15	5	2,0	80	55,46	57,22	56,01	55,01	1,01	1,02	1,04
15	5	2,0	90	55,46	57,22	56,01	55,82	0,99	1,00	1,02
15	5	2,0	99	55,46	57,22	56,01	57,40	0,97	0,98	1,00
15	5	2,0	100	55,46	57,22	56,01	58,35	0,95	0,96	0,98
15	5	10,0	3,5	104,46	228,72	176,60	-	-	-	-
15	5	10,0	5	104,46	228,72	176,60	4,29	24,35	41,16	53,31
15	5	10,0	5,5	104,46	228,72	176,60	5,33	19,59	33,12	42,90
15	5	10,0	10	104,46	228,72	176,60	9,80	10,66	18,01	23,33
15	5	10,0	20	104,46	228,72	176,60	15,76	6,63	11,21	14,51
15	5	10,0	30	104,46	228,72	176,60	20,92	4,99	8,44	10,93



15	5	10,0	40	104,46	228,72	176,60	26,12	4,00	6,76	8,76
15	5	10,0	50	104,46	228,72	176,60	31,77	3,29	5,56	7,20
15	5	10,0	60	104,46	228,72	176,60	38,64	2,70	4,57	5,92
15	5	10,0	70	104,46	228,72	176,60	51,33	2,04	3,44	4,46
15	5	10,0	80	104,46	228,72	176,60	183,97	0,57	0,96	1,24
15	5	10,0	90	104,46	228,72	176,60	194,93	0,54	0,91	1,17
15	5	10,0	99	104,46	228,72	176,60	196,15	0,53	0,90	1,17
15	5	10,0	100	104,46	228,72	176,60	-	-	-	-
15	40	2,0	3,5	54,84	56,53	55,50	21,81	2,51	2,54	2,59
15	40	2,0	5	54,84	56,53	55,50	25,12	2,18	2,21	2,25
15	40	2,0	5,5	54,84	56,53	55,50	26,36	2,08	2,11	2,14
15	40	2,0	10	54,84	56,53	55,50	35,44	1,55	1,57	1,59
15	40	2,0	20	54,84	56,53	55,50	41,82	1,31	1,33	1,35
15	40	2,0	30	54,84	56,53	55,50	50,56	1,08	1,10	1,12
15	40	2,0	40	54,84	56,53	55,50	53,60	1,02	1,04	1,05
15	40	2,0	50	54,84	56,53	55,50	54,69	1,00	1,01	1,03
15	40	2,0	60	54,84	56,53	55,50	55,44	0,99	1,00	1,02
15	40	2,0	70	54,84	56,53	55,50	56,05	0,98	0,99	1,01
15	40	2,0	80	54,84	56,53	55,50	56,87	0,96	0,98	0,99
15	40	2,0	90	54,84	56,53	55,50	57,49	0,95	0,97	0,98
15	40	2,0	99	54,84	56,53	55,50	543,55	0,10	0,10	0,10
15	40	2,0	100	54,84	56,53	55,50	-	-	-	-
15	40	10,0	3,5	118,40	232,49	188,82	12,43	9,53	15,19	18,71
15	40	10,0	5	118,40	232,49	188,82	14,75	8,03	12,80	15,76
15	40	10,0	5,5	118,40	232,49	188,82	15,42	7,68	12,24	15,07
15	40	10,0	10	118,40	232,49	188,82	20,38	5,81	9,27	11,41
15	40	10,0	20	118,40	232,49	188,82	28,82	4,11	6,55	8,07

15	40	10,0	30	118,40	232,49	188,82	36,28	3,26	5,21	6,41
15	40	10,0	40	118,40	232,49	188,82	43,88	2,70	4,30	5,30
15	40	10,0	50	118,40	232,49	188,82	53,13	2,23	3,55	4,38
15	40	10,0	60	118,40	232,49	188,82	77,52	1,53	2,44	3,00
15	40	10,0	70	118,40	232,49	188,82	107,53	1,10	1,76	2,16
15	40	10,0	80	118,40	232,49	188,82	197,35	0,60	0,96	1,18
15	40	10,0	90	118,40	232,49	188,82	271,14	0,44	0,70	0,86
15	40	10,0	99	118,40	232,49	188,82	635,15	0,19	0,30	0,37
15	40	10,0	100	118,40	232,49	188,82	-	-	-	-
120	5	2,0	3,5	65,00	66,59	65,63	12,36	5,26	5,31	5,39
120	5	2,0	5	65,00	66,59	65,63	13,40	4,85	4,90	4,97
120	5	2,0	5,5	65,00	66,59	65,63	13,73	4,73	4,78	4,85
120	5	2,0	10	65,00	66,59	65,63	16,77	3,88	3,91	3,97
120	5	2,0	20	65,00	66,59	65,63	24,43	2,66	2,69	2,73
120	5	2,0	30	65,00	66,59	65,63	28,00	2,32	2,34	2,38
120	5	2,0	40	65,00	66,59	65,63	60,73	1,07	1,08	1,10
120	5	2,0	50	65,00	66,59	65,63	62,43	1,04	1,05	1,07
120	5	2,0	60	65,00	66,59	65,63	63,34	1,03	1,04	1,05
120	5	2,0	70	65,00	66,59	65,63	64,02	1,02	1,03	1,04
120	5	2,0	80	65,00	66,59	65,63	64,63	1,01	1,02	1,03
120	5	2,0	90	65,00	66,59	65,63	65,30	1,00	1,01	1,02
120	5	2,0	99	65,00	66,59	65,63	66,25	0,98	0,99	1,01
120	5	2,0	100	65,00	66,59	65,63	66,56	0,98	0,99	1,00
120	5	10,0	3,5	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-
120	5	10,0	5	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-
120	5	10,0	5,5	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-
120	5	10,0	10	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-

120	5	10,0	20	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-
120	5	10,0	30	46,69	249,59	80,64	-	-	-	-
120	5	10,0	40	46,69	249,59	80,64	13,11	3,56	6,15	19,04
120	5	10,0	50	46,69	249,59	80,64	15,92	2,93	5,07	15,68
120	5	10,0	60	46,69	249,59	80,64	18,98	2,46	4,25	13,15
120	5	10,0	70	46,69	249,59	80,64	23,46	1,99	3,44	10,64
120	5	10,0	80	46,69	249,59	80,64	30,56	1,53	2,64	8,17
120	5	10,0	90	46,69	249,59	80,64	41,09	1,14	1,96	6,07
120	5	10,0	99	46,69	249,59	80,64	108,48	0,43	0,74	2,30
120	5	10,0	100	46,69	249,59	80,64	109,91	0,42	0,73	2,27
120	40	2,0	3,5	67,02	68,54	67,64	15,78	4,25	4,29	4,34
120	40	2,0	5	67,02	68,54	67,64	17,53	3,82	3,86	3,91
120	40	2,0	5,5	67,02	68,54	67,64	18,05	3,71	3,75	3,80
120	40	2,0	10	67,02	68,54	67,64	23,92	2,80	2,83	2,87
120	40	2,0	20	67,02	68,54	67,64	59,26	1,13	1,14	1,16
120	40	2,0	30	67,02	68,54	67,64	63,64	1,05	1,06	1,08
120	40	2,0	40	67,02	68,54	67,64	64,85	1,03	1,04	1,06
120	40	2,0	50	67,02	68,54	67,64	65,58	1,02	1,03	1,05
120	40	2,0	60	67,02	68,54	67,64	66,15	1,01	1,02	1,04
120	40	2,0	70	67,02	68,54	67,64	66,65	1,01	1,01	1,03
120	40	2,0	80	67,02	68,54	67,64	67,37	0,99	1,00	1,02
120	40	2,0	90	67,02	68,54	67,64	67,81	0,99	1,00	1,01
120	40	2,0	99	67,02	68,54	67,64	540,53	0,12	0,13	0,13
120	40	2,0	100	67,02	68,54	67,64	-	-	-	-
120	40	10,0	3,5	51,95	251,96	226,08	-	-	-	-
120	40	10,0	5	51,95	251,96	226,08	-	-	-	-
120	40	10,0	5,5	51,95	251,96	226,08	-	-	-	-

120	40	10,0	10	51,95	251,96	226,08	-	-	-	-
120	40	10,0	20	51,95	251,96	226,08	11,31	4,59	19,99	22,28
120	40	10,0	30	51,95	251,96	226,08	15,12	3,43	14,95	16,66
120	40	10,0	40	51,95	251,96	226,08	19,44	2,67	11,63	12,96
120	40	10,0	50	51,95	251,96	226,08	25,00	2,08	9,04	10,08
120	40	10,0	60	51,95	251,96	226,08	32,52	1,60	6,95	7,75
120	40	10,0	70	51,95	251,96	226,08	41,50	1,25	5,45	6,07
120	40	10,0	80	51,95	251,96	226,08	177,87	0,29	1,27	1,42
120	40	10,0	90	51,95	251,96	226,08	271,47	0,19	0,83	0,93
120	40	10,0	99	51,95	251,96	226,08	652,87	0,08	0,35	0,39
120	40	10,0	100	51,95	251,96	226,08	-	-	-	-
15	5	4,5	3,5	84,38	107,49	90,28	17,49	4,83	5,16	6,15
15	5	4,5	5	84,38	107,49	90,28	21,21	3,98	4,26	5,07
15	5	4,5	5,5	84,38	107,49	90,28	22,18	3,80	4,07	4,85
15	5	4,5	10	84,38	107,49	90,28	30,47	2,77	2,96	3,53
15	5	4,5	20	84,38	107,49	90,28	41,71	2,02	2,16	2,58
15	5	4,5	30	84,38	107,49	90,28	48,89	1,73	1,85	2,20
15	5	4,5	40	84,38	107,49	90,28	57,06	1,48	1,58	1,88
15	5	4,5	50	84,38	107,49	90,28	64,44	1,31	1,40	1,67
15	5	4,5	60	84,38	107,49	90,28	69,87	1,21	1,29	1,54
15	5	4,5	70	84,38	107,49	90,28	75,26	1,12	1,20	1,43
15	5	4,5	80	84,38	107,49	90,28	80,36	1,05	1,12	1,34
15	5	4,5	90	84,38	107,49	90,28	86,04	0,98	1,05	1,25
15	5	4,5	99	84,38	107,49	90,28	120,83	0,70	0,75	0,89
15	5	4,5	100	84,38	107,49	90,28	124,62	0,68	0,72	0,86
15	5	7,0	3,5	124,46	162,73	139,42	11,53	10,79	12,09	14,11
15	5	7,0	5	124,46	162,73	139,42	15,49	8,03	9,00	10,50

15	5	7,0	5,5	124,46	162,73	139,42	16,38	7,60	8,51	9,94
15	5	7,0	10	124,46	162,73	139,42	21,81	5,71	6,39	7,46
15	5	7,0	20	124,46	162,73	139,42	30,31	4,11	4,60	5,37
15	5	7,0	30	124,46	162,73	139,42	38,80	3,21	3,59	4,19
15	5	7,0	40	124,46	162,73	139,42	48,32	2,58	2,89	3,37
15	5	7,0	50	124,46	162,73	139,42	58,11	2,14	2,40	2,80
15	5	7,0	60	124,46	162,73	139,42	67,48	1,84	2,07	2,41
15	5	7,0	70	124,46	162,73	139,42	77,05	1,62	1,81	2,11
15	5	7,0	80	124,46	162,73	139,42	118,86	1,05	1,17	1,37
15	5	7,0	90	124,46	162,73	139,42	130,67	0,95	1,07	1,25
15	5	7,0	99	124,46	162,73	139,42	193,33	0,64	0,72	0,84
15	5	7,0	100	124,46	162,73	139,42	197,35	0,63	0,71	0,82
15	40	4,5	3,5	86,25	107,73	91,78	31,21	2,76	2,94	3,45
15	40	4,5	5	86,25	107,73	91,78	35,98	2,40	2,55	2,99
15	40	4,5	5,5	86,25	107,73	91,78	37,24	2,32	2,46	2,89
15	40	4,5	10	86,25	107,73	91,78	45,06	1,91	2,04	2,39
15	40	4,5	20	86,25	107,73	91,78	55,75	1,55	1,65	1,93
15	40	4,5	30	86,25	107,73	91,78	64,29	1,34	1,43	1,68
15	40	4,5	40	86,25	107,73	91,78	69,39	1,24	1,32	1,55
15	40	4,5	50	86,25	107,73	91,78	73,54	1,17	1,25	1,46
15	40	4,5	60	86,25	107,73	91,78	78,04	1,11	1,18	1,38
15	40	4,5	70	86,25	107,73	91,78	82,74	1,04	1,11	1,30
15	40	4,5	80	86,25	107,73	91,78	89,54	0,96	1,03	1,20
15	40	4,5	90	86,25	107,73	91,78	107,04	0,81	0,86	1,01
15	40	4,5	99	86,25	107,73	91,78	639,53	0,13	0,14	0,17
15	40	4,5	100	86,25	107,73	91,78	-	-	-	-
15	40	7,0	3,5	127,98	164,47	142,81	26,84	4,77	5,32	6,13

15	40	7,0	5	127,98	164,47	142,81	29,71	4,31	4,81	5,54
15	40	7,0	5,5	127,98	164,47	142,81	30,55	4,19	4,67	5,38
15	40	7,0	10	127,98	164,47	142,81	36,74	3,48	3,89	4,48
15	40	7,0	20	127,98	164,47	142,81	47,54	2,69	3,00	3,46
15	40	7,0	30	127,98	164,47	142,81	59,13	2,16	2,42	2,78
15	40	7,0	40	127,98	164,47	142,81	71,45	1,79	2,00	2,30
15	40	7,0	50	127,98	164,47	142,81	82,03	1,56	1,74	2,00
15	40	7,0	60	127,98	164,47	142,81	95,40	1,34	1,50	1,72
15	40	7,0	70	127,98	164,47	142,81	121,78	1,05	1,17	1,35
15	40	7,0	80	127,98	164,47	142,81	137,06	0,93	1,04	1,20
15	40	7,0	90	127,98	164,47	142,81	182,43	0,70	0,78	0,90
15	40	7,0	99	127,98	164,47	142,81	656,72	0,19	0,22	0,25
15	40	7,0	100	127,98	164,47	142,81	-	-	-	-
120	5	4,5	3,5	98,76	118,32	104,90	-	-	-	-
120	5	4,5	5	98,76	118,32	104,90	-	-	-	-
120	5	4,5	5,5	98,76	118,32	104,90	-	-	-	-
120	5	4,5	10	98,76	118,32	104,90	14,30	6,91	7,34	8,28
120	5	4,5	20	98,76	118,32	104,90	28,39	3,48	3,69	4,17
120	5	4,5	30	98,76	118,32	104,90	37,39	2,64	2,81	3,16
120	5	4,5	40	98,76	118,32	104,90	42,32	2,33	2,48	2,80
120	5	4,5	50	98,76	118,32	104,90	47,35	2,09	2,22	2,50
120	5	4,5	60	98,76	118,32	104,90	75,91	1,30	1,38	1,56
120	5	4,5	70	98,76	118,32	104,90	90,20	1,09	1,16	1,31
120	5	4,5	80	98,76	118,32	104,90	96,96	1,02	1,08	1,22
120	5	4,5	90	98,76	118,32	104,90	108,25	0,91	0,97	1,09
120	5	4,5	99	98,76	118,32	104,90	122,51	0,81	0,86	0,97
120	5	4,5	100	98,76	118,32	104,90	125,11	0,79	0,84	0,95

120	5	7,0	3,5	138,55	175,86	155,60	-	-	-	-
120	5	7,0	5	138,55	175,86	155,60	-	-	-	-
120	5	7,0	5,5	138,55	175,86	155,60	-	-	-	-
120	5	7,0	10	138,55	175,86	155,60	-	-	-	-
120	5	7,0	20	138,55	175,86	155,60	-	-	-	-
120	5	7,0	30	138,55	175,86	155,60	12,56	11,03	12,39	14,00
120	5	7,0	40	138,55	175,86	155,60	15,46	8,96	10,06	11,37
120	5	7,0	50	138,55	175,86	155,60	18,86	7,35	8,25	9,32
120	5	7,0	60	138,55	175,86	155,60	24,30	5,70	6,40	7,24
120	5	7,0	70	138,55	175,86	155,60	33,23	4,17	4,68	5,29
120	5	7,0	80	138,55	175,86	155,60	58,65	2,36	2,65	3,00
120	5	7,0	90	138,55	175,86	155,60	172,19	0,80	0,90	1,02
120	5	7,0	99	138,55	175,86	155,60	193,33	0,72	0,80	0,91
120	5	7,0	100	138,55	175,86	155,60	197,24	0,70	0,79	0,89
120	40	4,5	3,5	100,49	118,80	105,52	23,39	4,30	4,51	5,08
120	40	4,5	5	100,49	118,80	105,52	30,69	3,27	3,44	3,87
120	40	4,5	5,5	100,49	118,80	105,52	31,60	3,18	3,34	3,76
120	40	4,5	10	100,49	118,80	105,52	35,53	2,83	2,97	3,34
120	40	4,5	20	100,49	118,80	105,52	42,94	2,34	2,46	2,77
120	40	4,5	30	100,49	118,80	105,52	47,27	2,13	2,23	2,51
120	40	4,5	40	100,49	118,80	105,52	82,33	1,22	1,28	1,44
120	40	4,5	50	100,49	118,80	105,52	91,04	1,10	1,16	1,30
120	40	4,5	60	100,49	118,80	105,52	95,20	1,06	1,11	1,25
120	40	4,5	70	100,49	118,80	105,52	98,81	1,02	1,07	1,20
120	40	4,5	80	100,49	118,80	105,52	106,82	0,94	0,99	1,11
120	40	4,5	90	100,49	118,80	105,52	116,56	0,86	0,91	1,02
120	40	4,5	99	100,49	118,80	105,52	638,73	0,16	0,17	0,19

120	40	4,5	100	100,49	118,80	105,52	-	-	-	-
120	40	7,0	3,5	144,15	176,61	156,47	-	-	-	-
120	40	7,0	5	144,15	176,61	156,47	-	-	-	-
120	40	7,0	5,5	144,15	176,61	156,47	-	-	-	-
120	40	7,0	10	144,15	176,61	156,47	11,44	12,61	13,68	15,44
120	40	7,0	20	144,15	176,61	156,47	16,94	8,51	9,24	10,43
120	40	7,0	30	144,15	176,61	156,47	22,98	6,27	6,81	7,69
120	40	7,0	40	144,15	176,61	156,47	29,91	4,82	5,23	5,90
120	40	7,0	50	144,15	176,61	156,47	35,54	4,06	4,40	4,97
120	40	7,0	60	144,15	176,61	156,47	51,22	2,81	3,05	3,45
120	40	7,0	70	144,15	176,61	156,47	136,39	1,06	1,15	1,29
120	40	7,0	80	144,15	176,61	156,47	149,98	0,96	1,04	1,18
120	40	7,0	90	144,15	176,61	156,47	184,64	0,78	0,85	0,96
120	40	7,0	99	144,15	176,61	156,47	656,26	0,22	0,24	0,27
120	40	7,0	100	144,15	176,61	156,47	-	-	-	-
15	5	25,0	3,5	47,46	313,30	82,32	-	-	-	-
15	5	25,0	5	47,46	313,30	82,32	-	-	-	-
15	5	25,0	5,5	47,46	313,30	82,32	-	-	-	-
15	5	25,0	10	47,46	313,30	82,32	-	-	-	-
15	5	25,0	20	47,46	313,30	82,32	-	-	-	-
15	5	25,0	30	47,46	313,30	82,32	6,64	7,14	12,39	47,17
15	5	25,0	40	47,46	313,30	82,32	9,60	4,95	8,58	32,65
15	5	25,0	50	47,46	313,30	82,32	13,25	3,58	6,22	23,65
15	5	25,0	60	47,46	313,30	82,32	18,37	2,58	4,48	17,05
15	5	25,0	70	47,46	313,30	82,32	26,63	1,78	3,09	11,76
15	5	25,0	80	47,46	313,30	82,32	41,79	1,14	1,97	7,50
15	5	25,0	90	47,46	313,30	82,32	67,10	0,71	1,23	4,67



15	5	25,0	99	47,46	313,30	82,32	96,16	0,49	0,86	3,26
15	5	25,0	100	47,46	313,30	82,32	100,14	0,47	0,82	3,13
120	5	25,0	3,5	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	5	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	5,5	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	10	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	20	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	30	39,54	270,87	70,81	-	-	-	-
120	5	25,0	40	39,54	270,87	70,81	9,28	4,26	7,63	29,20
120	5	25,0	50	39,54	270,87	70,81	13,49	2,93	5,25	20,07
120	5	25,0	60	39,54	270,87	70,81	17,72	2,23	4,00	15,28
120	5	25,0	70	39,54	270,87	70,81	24,28	1,63	2,92	11,16
120	5	25,0	80	39,54	270,87	70,81	37,66	1,05	1,88	7,19
120	5	25,0	90	39,54	270,87	70,81	63,16	0,63	1,12	4,29
120	5	25,0	99	39,54	270,87	70,81	93,07	0,42	0,76	2,91
120	5	25,0	100	39,54	270,87	70,81	97,06	0,41	0,73	2,79
15	40	25,0	3,5	54,74	469,35	94,54	-	-	-	-
15	40	25,0	5	54,74	469,35	94,54	-	-	-	-
15	40	25,0	5,5	54,74	469,35	94,54	-	-	-	-
15	40	25,0	10	54,74	469,35	94,54	4,31	12,70	21,93	108,87
15	40	25,0	20	54,74	469,35	94,54	8,26	6,63	11,44	56,81
15	40	25,0	30	54,74	469,35	94,54	11,80	4,64	8,01	39,79
15	40	25,0	40	54,74	469,35	94,54	15,92	3,44	5,94	29,48
15	40	25,0	50	54,74	469,35	94,54	21,38	2,56	4,42	21,95
15	40	25,0	60	54,74	469,35	94,54	29,61	1,85	3,19	15,85
15	40	25,0	70	54,74	469,35	94,54	45,14	1,21	2,09	10,40
15	40	25,0	80	54,74	469,35	94,54	91,48	0,60	1,03	5,13

15	40	25,0	90	54,74	469,35	94,54	117,60	0,47	0,80	3,99
15	40	25,0	99	54,74	469,35	94,54	319,25	0,17	0,30	1,47
15	40	25,0	100	54,74	469,35	94,54	338,65	0,16	0,28	1,39
120	40	25,0	3,5	42,05	289,06	77,05	-	-	-	-
120	40	25,0	5	42,05	289,06	77,05	-	-	-	-
120	40	25,0	5,5	42,05	289,06	77,05	-	-	-	-
120	40	25,0	10	42,05	289,06	77,05	-	-	-	-
120	40	25,0	20	42,05	289,06	77,05	-	-	-	-
120	40	25,0	30	42,05	289,06	77,05	10,36	4,06	7,44	27,89
120	40	25,0	40	42,05	289,06	77,05	13,80	3,05	5,58	20,94
120	40	25,0	50	42,05	289,06	77,05	17,89	2,35	4,31	16,15
120	40	25,0	60	42,05	289,06	77,05	23,65	1,78	3,26	12,22
120	40	25,0	70	42,05	289,06	77,05	34,09	1,23	2,26	8,48
120	40	25,0	80	42,05	289,06	77,05	82,32	0,51	0,94	3,51
120	40	25,0	90	42,05	289,06	77,05	285,97	0,15	0,27	1,01
120	40	25,0	99	42,05	289,06	77,05	316,45	0,13	0,24	0,91
120	40	25,0	100	42,05	289,06	77,05	334,82	0,13	0,23	0,86
15	5	15,0	3,5	72,43	324,34	131,20	-	-	-	-
15	5	15,0	5	72,43	324,34	131,20	-	-	-	-
15	5	15,0	5,5	72,43	324,34	131,20	-	-	-	-
15	5	15,0	10	72,43	324,34	131,20	-	-	-	-
15	5	15,0	20	72,43	324,34	131,20	8,77	8,26	14,96	36,97
15	5	15,0	30	72,43	324,34	131,20	12,78	5,67	10,27	25,39
15	5	15,0	40	72,43	324,34	131,20	17,31	4,18	7,58	18,74
15	5	15,0	50	72,43	324,34	131,20	22,81	3,18	5,75	14,22
15	5	15,0	60	72,43	324,34	131,20	29,60	2,45	4,43	10,96
15	5	15,0	70	72,43	324,34	131,20	37,93	1,91	3,46	8,55

15	5	15,0	80	72,43	324,34	131,20	48,09	1,51	2,73	6,74
15	5	15,0	90	72,43	324,34	131,20	153,84	0,47	0,85	2,11
15	5	15,0	99	72,43	324,34	131,20	169,67	0,43	0,77	1,91
15	5	15,0	100	72,43	324,34	131,20	171,38	0,42	0,77	1,89
120	5	15,0	3,5	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	5	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	5,5	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	10	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	20	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	30	42,69	250,22	71,50	-	-	-	-
120	5	15,0	40	42,69	250,22	71,50	11,86	3,60	6,03	21,09
120	5	15,0	50	42,69	250,22	71,50	14,66	2,91	4,88	17,07
120	5	15,0	60	42,69	250,22	71,50	19,07	2,24	3,75	13,12
120	5	15,0	70	42,69	250,22	71,50	25,49	1,67	2,80	9,81
120	5	15,0	80	42,69	250,22	71,50	34,52	1,24	2,07	7,25
120	5	15,0	90	42,69	250,22	71,50	46,78	0,91	1,53	5,35
120	5	15,0	99	42,69	250,22	71,50	61,51	0,69	1,16	4,07
120	5	15,0	100	42,69	250,22	71,50	63,66	0,67	1,12	3,93
15	40	15,0	3,5	83,22	335,05	149,46	4,96	16,78	30,15	67,58
15	40	15,0	5	83,22	335,05	149,46	6,58	12,66	22,73	50,96
15	40	15,0	5,5	83,22	335,05	149,46	7,01	11,88	21,33	47,82
15	40	15,0	10	83,22	335,05	149,46	10,13	8,21	14,75	33,07
15	40	15,0	20	83,22	335,05	149,46	15,96	5,21	9,37	20,99
15	40	15,0	30	83,22	335,05	149,46	22,30	3,73	6,70	15,03
15	40	15,0	40	83,22	335,05	149,46	30,12	2,76	4,96	11,12
15	40	15,0	50	83,22	335,05	149,46	39,94	2,08	3,74	8,39
15	40	15,0	60	83,22	335,05	149,46	51,47	1,62	2,90	6,51

15	40	15,0	70	83,22	335,05	149,46	64,56	1,29	2,31	5,19
15	40	15,0	80	83,22	335,05	149,46	283,05	0,29	0,53	1,18
15	40	15,0	90	83,22	335,05	149,46	296,37	0,28	0,50	1,13
15	40	15,0	99	83,22	335,05	149,46	310,70	0,27	0,48	1,08
15	40	15,0	100	83,22	335,05	149,46	322,26	0,26	0,46	1,04
120	40	15,0	3,5	48,00	274,89	77,59	-	-	-	-
120	40	15,0	5	48,00	274,89	77,59	-	-	-	-
120	40	15,0	5,5	48,00	274,89	77,59	-	-	-	-
120	40	15,0	10	48,00	274,89	77,59	-	-	-	-
120	40	15,0	20	48,00	274,89	77,59	-	-	-	-
120	40	15,0	30	48,00	274,89	77,59	12,88	3,73	6,03	21,35
120	40	15,0	40	48,00	274,89	77,59	15,88	3,02	4,89	17,32
120	40	15,0	50	48,00	274,89	77,59	21,02	2,28	3,69	13,08
120	40	15,0	60	48,00	274,89	77,59	29,76	1,61	2,61	9,24
120	40	15,0	70	48,00	274,89	77,59	44,08	1,09	1,76	6,24
120	40	15,0	80	48,00	274,89	77,59	156,66	0,31	0,50	1,75
120	40	15,0	90	48,00	274,89	77,59	175,67	0,27	0,44	1,56
120	40	15,0	99	48,00	274,89	77,59	195,54	0,25	0,40	1,41
120	40	15,0	100	48,00	274,89	77,59	207,42	0,23	0,37	1,33